

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Roman Širanović

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Darko Ivančević, mag.ing.aeroing.

Student:

Roman Širanović

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se kolegi Vedranu Škodi na ustupljenim CT snimkama.

Zahvaljujem se poslijedoktorandici dr.sc. Jasni Leder Horini na uloženom vremenu i savjetima prilikom obrade CT snimaka.

Posebno se zahvaljujem doc.dr.sc. Darku Ivančeviću na nesebičnoj pomoći, strpljenju i cjelokupnom vodstvu kroz proces izrade ovog diplomskog rada.

Roman Širanović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Roman Širanović** Mat. br.: 0035180230

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza naprezanja motociklističke kacige pri udarnom opterećenju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Stress Analysis of a Motorcycle Helmet at Impact Loading**

Opis zadatka:

Izvršiti numeričku analizu udara motociklističke kacige pri početnim brzinama i rubnim uvjetima definiranim u standardima prema kojima se vrše ispitivanja takvih kaciga.

U radu modelirati materijal lubanje, likvora te mozga odgovarajućim pojednostavljenim biomehaničkim modelima. Kod opisa numeričkog modela glave potrebno je posvetiti posebnu pozornost zadavanju rubnih uvjeta i definiciji kontaktnih površina između svih elemenata za numeričko modeliranje kontakta koji se javlja kod biomehaničkog sustava sastavljenog od više elemenata.

Numerički model kacige treba predstavljati pojednostavljenu konstrukciju motociklističke kacige sastavljenu od nekoliko slojeva izrađenih od različitih materijala. Kod opisa numeričkog modela kacige potrebno je posebnu pozornost posvetiti opisu korištenih pojednostavljenja. Mehanička svojstva materijala kacige definirati prema dostupnim vrijednostima iz literature te izvršiti potrebne konstrukcijske promjene obzirom na dobivene vrijednosti naprezanja ili kriterija popuštanja kompozitnih materijala.

U radu koristiti programe za računalno modeliranje, a numeričku analizu izvršiti korištenjem programa Abaqus/Explicit.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Darko Ivančević

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. ZAŠTITNA OPREMA	2
2.1. Odjeća	2
2.2. Obuća	3
2.3. Rukavice.....	4
2.4. Kaciga	4
2.4.1. Tipovi kaciga:	6
2.5. KONSTRUKCIJA KACIGE	7
2.5.1. Vanjska ljuska	8
2.5.1.1. Vanjske ljuske od termoplastike	8
2.5.1.2. Kompozitne ljuske	8
2.5.2. Apsorpcijski sloj	11
2.5.3. Ostale komponente kacige	12
2.5.3.1. Ergonomski sloj	12
2.5.3.2. Sustav za vezivanje	12
2.5.3.3. Sustav za ventilaciju	13
2.5.3.4. Vizir	13
3. STANDARDI ZA ISPITIVANJE KACIGA.....	14
3.1. ECE R22.05 [22].....	15
3.1.1. Apsorpcija energije udarca	15
3.1.2. Ispitivanje krutosti kacige	17
3.1.3. Dinamička izdrživost vezivnog sustava.....	17
3.2. Ispitne glave	17
3.3. Usporedba standarda	18
4. NUMERIČKI MODEL	19
4.1. Anatomija glave	19
4.1.1. Lubanja	19
4.1.2. Moždane ovojnice.....	20
4.1.3. Mozak	20
4.2. Numerički model glave.....	21
4.2.1. Numerički model skalpa s licem.....	23
4.2.2. Numerički model lubanje.....	24
4.2.3. Numerički model dure mater i subarahnoidnog prostora.....	25
4.2.4. Numerički model mozga	26
4.3. Numerički model kacige	27

4.3.1. Vanjska ljuska	29
4.3.1.1. Hashinov kriterij popuštanja [42]	31
4.3.2. Apsorpcijski sloj	34
4.3.2.1. Crushable Foam	34
5. REZULTATI	38
5.1. Validacija numeričkog modela	38
5.1.1. SUFEHM model glave.....	38
5.1.2. Simulacija udarca u glavu i validacija numeričkog modela	39
5.1.3. Usporedba dobivenih rezultata.....	42
5.2. Numerička analiza ispitivanja udarca u kacigu.....	44
6. ZAKLJUČAK.....	52
LITERATURA.....	53
PRILOZI.....	57

POPIS SLIKA

Slika 1.	Daimlerov i Maybachov "motocikl" [2].....	1
Slika 2.	Kožna jakna s ugrađenim protektorima [4].....	2
Slika 3.	Ispitivanje uzorka prema standardu EN 13595-1:2002 [5]	3
Slika 4.	Motociklističke čizme [3].....	3
Slika 5.	Motociklistička rukavica [6]	4
Slika 6.	Cyril Pullin, pobjednik utrke <i>Isle of Man TT</i> 1914. godine [7].....	5
Slika 7.	Zatvorena kaciga [11].....	6
Slika 8.	Modularna kaciga u otvorenom položaju [12]	7
Slika 9.	Skica kacige s označenim dijelovima [13]	7
Slika 10.	Izrada kompozitne ljuske [15]	9
Slika 11.	Postupak proizvodnje kompozitne kacige a.) Slaganje kompozitnih listova na kalup, b.) Orijentacija slojeva na neobrađenoj ljusci kacige, c.) Obradena ljuska kacige sa prikazanom orijentacijom slojeva [18]	9
Slika 12.	Orijentacija vlakana kompozita na različitim dijelovima kacige [19]	10
Slika 13.	Različite gustoće apsorpcijskog dijela kacige [20]	11
Slika 14.	Ergonomski sloj motociklističke kacige [21].....	12
Slika 15.	Izmjena zraka pomoću sustava za ventilaciju [21].....	13
Slika 16.	Označene točke udara u kacigu [22]	15
Slika 17.	Brzine udara kacige u nakovanj pri ispitivanju [22]	16
Slika 18.	Različite veličine glava prema standardima a) DOT, b) ISO/EN960 [24].....	17
Slika 19.	Kosti ljudske lubanje [28]	19
Slika 20.	a) Obrada CT snimaka u Materialise Mimics programu, b) 3D model generiran u Materialise Mimics-u	21
Slika 21.	Dijelovi numeričkog modela glave u presijeku.....	22
Slika 22.	Vanjski dio glave diskretiziran konačnim elementima tipa C3D4.....	23
Slika 23.	Model lubanje: a) lubanja izrađena pomoću CT snimaka, b) površinama modelirana lubanja, c) podudarnost modela.....	24
Slika 24.	Presjek modelirane lubanje sa prikazanim C3D4 elementima.....	25
Slika 25.	Mreža konačnih elemenata: a) polovica modela <i>dure mater</i> , b) subarahnoidni prostor.....	25
Slika 26.	Različite gustoće mreža modela mozga: a) mreža 1, b) mreža 2, c) mreža 3	26
Slika 27.	Numerički model kacige: a) površina apsorpcijskog sloja povezana kinematskom vezom, b) deformirani dio apsorpcijskog sloja u provedenoj simulaciji, c) apsorpcijski sloj nakon provedenog ispitivanja [36]	28
Slika 28.	Mreža konačnih elemenata komponenta kacige a) kompozitna ljuska, b) ljuska od ABS-a, c) apsorpcijski sloj	28
Slika 29.	Referentne osi u odnosu na koje se mjeri orijentacija slojeva vanjske ljuske.....	29
Slika 30.	Dijagram naprezanje ekvivalentni pomak za kompozit ojačan vlaknima [39]	33
Slika 31.	Dijagram naprezanje deformacija EPS-a različite gustoće: a) 65 kg/m ³ b) 90 kg/m ³ [16]	35
Slika 32.	<i>Crushable Foam</i> s volumnim očvršćenjem [39]	35
Slika 33.	SUFEHM model glave [32]	38
Slika 34.	SUFEHM model s konfiguracijom eksperimentalnog ispitivanja [32].....	39
Slika 35.	Udarač diskretiziran konačnim elementima sa prikazanim dijelovima.....	40
Slika 36.	Pozicija udarača u odnosu na glavu i točke mjerenih vrijednosti tlaka.....	41
Slika 37.	Dijagrami usporedbe utjecaja gustoće mreže na tlakove u odabranim točkama... ..	42

Slika 38.	Dijagrami usporedbe vrijednosti tlakova u odabranim točkama s eksperimentalnim i numeričkim rezultatima iz [32]	43
Slika 39.	Točka mjerenja akceleracije na početnom položaju numeričkog modela kacige s glavom	45
Slika 40.	Prikaz ekvivalentne plastične deformacije [-] apsorpcijskog sloja kacige s kompozitnom ljuskom kroz vrijeme.....	45
Slika 41.	Usporedba ekvivalentne plastične deformacije [-] apsorpcijskog sloja: a) kompozitne ljuske, b) ljuske od ABS-a.....	46
Slika 42.	Ekvivalentno naprezanje po Von Misesu [MPa] za a) ljusku kacige od ABS-a, b) vanjski sloj kompozitne ljuske	46
Slika 43.	Vrijednost Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja vlakana [-] u drugom i dvanaestom sloju kompozitne ljuske.....	47
Slika 44.	Parametar tlačnog oštećenja vlakana	48
Slika 45.	Vrijednost Hashinovog kriterija vlačnog popuštanja vlakana [-] u drugom i trećem sloju kompozitne ljuske.....	49
Slika 46.	Vrijednost Hashinovog kriterija vlačnog popuštanja matrice [-] u prvom sloju kompozitne ljuske.....	50
Slika 47.	Dijagram akceleracije sa kompozitnom vanjskom ljuskom.....	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva ABS-a [16].....	8
Tablica 2. Usporedba osnovnih mehaničkih svojstava EPS-a različite gustoće [20].....	11
Tablica 3. Usporedba standarda [25].....	18
Tablica 4. Popis kostiju lubanje [27].....	19
Tablica 5. Pregled diskretizacije konačnim elementima pojedinih dijelova i cijelog modela glave	22
Tablica 6. Mehanička svojstva vanjskog dijela glave [32]	23
Tablica 7. Mehanička svojstva lubanje [32].....	24
Tablica 8. Mehanička svojstva dure mater [32]	25
Tablica 9. Mehanička svojstva mozga [34].....	26
Tablica 10. Prikaz podataka konačnih elemenata numeričkog modela kacige	28
Tablica 11. Raspored slojeva vanjske ljuske kacige	30
Tablica 12. Svojstva kompozita korištenog za vanjsku ljusku kacige [40], [41]	31
Tablica 13. Tablica očvrsnuća EPS-a različitih gustoća [16].....	37
Tablica 14. Svojstva EPS-a gustoće 65 kg/m ³ [16]	37
Tablica 15. Svojstva udarača [32]	40
Tablica 16. Podaci o numeričkom modelu udarača	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	Površina
C	MPa	Tenzor elastičnosti
d	mm	Promjer
E	MPa	Modul elastičnosti
E_1	MPa	Modul elastičnosti u smjeru vlakana
E_2	MPa	Modul elastičnosti u smjeru okomitom na smjer vlakana
\bar{g}_i^P	-	Smični modul opuštanja
\bar{k}_i^P	-	Volumni modul opuštanja
G_{1T}	J/m^2	Vlačna energija loma u smjeru vlakana
G_{1C}	J/m^2	Tlačna energija loma u smjeru vlakana
G_{2T}	J/m^2	Vlačna energija loma u smjeru okomitom na smjer vlakana
G_{2C}	J/m^2	Tlačna energija loma u smjeru okomitom na smjer vlakana
G_{ij}	MPa	Modul smicanja u ravnini i - j
h	mm	Visina
m	kg	Masa
p	MPa	Tlak
X^C	MPa	Tlačna čvrstoća u smjeru vlakana
X^T	MPa	Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana
Y^C	MPa	Tlačna čvrstoća okomita na smjer vlakana
Y^T	MPa	Vlačna čvrstoća okomita na smjer vlakana
S	MPa	Smična čvrstoća sloja
t	s	Vrijeme
t_i	s	Vrijeme u i -tom trenutku
$\varepsilon_{uc, L}$	-	Tlačna prekidna deformacija u smjeru vlakana
$\varepsilon_{ut, L}$	-	Vlačna prekidna defomacija u smjeru vlakana
$\varepsilon_{uc, T}$	-	Tlačna prekidna deformacija okomita na smjer vlakana
$\varepsilon_{ut, T}$	-	Vlačna prekidna defomacija okomita na smjer vlakana
ρ	kg/m^3	Gustoća
τ_i	s	Vrijeme opuštanja
τ_u	MPa	Smična čvrstoća
ν	-	Poissonov koeficijent
γ_u	-	Kutna deformacija

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je izvršiti analizu naprezanja motociklističke kacige pri udarnom opterećenju. Računalno modeliranje geometrije izvršeno je pomoću programa SolidWorks, a numerička analiza programom Abaqus/Explicit.

Na početku rada iznesen je pregled zaštitne motociklističke opreme, te je opisana konstrukcija kacige. Prilikom modeliranja glave korištene su CT snimke za dobivanje geometrijske reference za model lubanje. Validacija numeričkog modela glave izvršena je usporedbom rezultata s numeričkim i eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi. Ispitivanje apsorpcije energije udarca provedeno je s početnim uvjetima propisanim standardom za što su korištene ljuske načinjene od različitih materijala. Popuštanje kompozitnog materijala određeno je prema Hashinovom kriteriju popuštanja.

Ključne riječi: motociklistička kaciga, standard ECE R22.05, numerički model glave, kompozit, metoda konačnih elemenata, Hashinov kriterij popuštanja.

SUMMARY

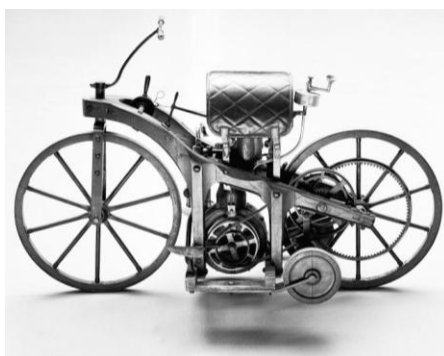
The subject of this thesis is to perform a stress analysis of a motorcycle helmet under impact load. Computer aided design of the geometry was done using SolidWorks, while the numerical analysis was performed in Abaqus/Explicit.

An overview of motorcycle protective gear and the design of the helmet was described in the introduction of the thesis. CT scans of the skull were used to obtain the realistic geometry, which was used as a reference for the CAD model of the skull. Validation of the head numerical model was done by comparison with numerical and experimental results from the literature. Impact energy absorption test was done with the initial conditions prescribed by standards, while shells made of different materials were used in the numerical analyses. Failure of the composite material was modelled using the Hashin's failure criteria.

Key words: motorcycle helmet, ECE R22.05 standard, numerical head model, composite, finite element method, Hashin failure criteria.

1. UVOD

Motocikli su se prvi put pojavili u drugoj polovici 19. stoljeća. Jedan od pionira moto industrije svakako je Amerikanac Sylvester Howard Roper, koji je konstruirao dvokotač pokretan parnim motorom. 1885. godine njemački izumitelji Gottlieb Daimler i Wilhelm Maybach konstruiraju drveni bicikl s ugrađenim benzinskim motorom, postavljajući tako temelje za razvoj motocikala kakve danas poznajemo (Slika 1). Današnje motocikle i dalje definiraju osnovne karakteristike kao što su dva kotača pogonjena uglavnom benzinskim motorom. Napredak i razvoj tehnologije pratili su i motocikli. Pojavila se mogućnost korištenja raznih električnih pomagala poput ABS-a ili putnog računala, dok se snaga motora tokom godina povećavala, kao i brzine koje su motocikli mogli razvijati [1].



Slika 1. Daimlerov i Maybachov "motocikl" [2]

Povećanjem brzine koju su motocikli postizali, te paralelnim povećanjem broja motocikala u prometu, neizbježno je dolazilo do prometnih nezgoda. Kako bi se umanjila mogućnost ozljede, te spriječile kobne posljedice, došlo je do razvoja zaštitne opreme.

U nastavku diplomskog rada prikazan je pojednostavljeni model ljudske glave diskretiziran konačnim elementima. Korištenjem krutog cilindra sa oblogom provedena je simulacija udarca u model glave s definiranim parametrima. Dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima provjerenog modela Strasbourskog sveučilišta. Nakon usporedbe rezultata, modelirana je kaciga koja je sastavljena od vanjske kompozitne ljuske i apsorpcijskog sloja. Prema odabranom standardu za ispitivanje motociklističkih kaciga, modelirana kaciga i model glave postavljeni su u odgovarajući položaj s definiranim parametrima, nakon čega je provedena numerička analiza naprezanja pri udarnom opterećenju.

2. ZAŠTITNA OPREMA

Korištenje zaštitne opreme prilikom vožnje motocikla može značiti razliku između teške tjelesne povrede i preživljavanja prometne nezgode bez težih posljedica. Za postizanje što bolje zaštite koriste se različiti dijelovi opreme za različite dijelove ljudskog tijela. Svaki od komada zaštitne opreme, posebno je konstruiran, ispitan i certificiran od strane odgovarajućeg ispitnog tijela. Zaštitnu opremu možemo u grubo podijeliti na: odjeću, obuću, rukavice, razne protektore i pojaseve, te kaciju o kojoj će se detaljnije govoriti u nastavku.

2.1. Odjeća

Zaštitnu odjeću možemo podijeliti prema nekoliko kriterija. Jedan od kriterija bio bi broj dijelova odjeće. Zaštitna obuća može biti jednodjelna ili dvodjelna. Dvodjelna oprema se sastoji od jakne i hlača. Drugi kriterij podjele je materijal. Zaštitna odjeća se najčešće izrađuje od kože, ali se također može izraditi od tekstila. Kožna motociklistička jakna sa ugrađenim protektorima proizvođača MTECH, prikazana je na slici (Slika 2). Za pružanje zaštite prilikom udara, u odjeći se nalaze protektori čija je uloga apsorbirati i raspodijeliti energiju na što veću površinu. Uglavnom su izrađeni od pjena visoke gustoće, raznih polimera, kompozita od karbonskih vlakana, te titana. Protektori se nalaze na glavnim udarnim mjestima poput ramena, leđa, koljena, laktova. Europski standard za certificiranje protektora je EN 1621-1:2007 i EN 1621-2:2003 [3].



Slika 2. Kožna jakna s ugrađenim protektorima [4]

Standard koji se primjenjuje za certificiranje zaštitne obuće načinjene od kože je EN 13595-1:2002. Ispitivanje prema navedenom standardu sastoji se od nekoliko koraka. Jedan od njih je abrazija u kojem se ispitni uzorak postavlja na brusni papir zrnatosti 60 koji se pomiče brzinom od 8 m/s (Slika 3). Ovaj korak je završen nakon što se u ispitnom uzorku pojave rupe. Idući korak je postavljanje kružnog uzorka na uređaj koji nameće tlak sa unutarnje strane uzorka. Na taj način osigurava se jednoliko djelovanje sile u svim smjerovima na uzorak. Mjeri se tlak potreban za pucanje uzorka. Uzorak se također ispituje na probijanje na način da se postavi na podlogu koja sadrži pravokutnu rupu. Uređaj za probijanje poznate mase s oštricom udara u ispitni uzorak definiranom energijom. U ovom koraku se mjeri maksimalna penetracija oštrice kroz materijal [5].



Slika 3. Ispitivanje uzorka prema standardu EN 13595-1:2002 [5]

2.2. Obuća

Zaštitna obuća je dio motociklističke opreme koja štiti stopala vozača. Motociklističke čizme su ojačane na zglobovima, te imaju zaštitnu kapu kod prstiju nogu (Slika 4). Konstruirane su na način da se odupru trošenju abrazijom i izdrže udarna opterećenja. Čizme također moraju dobro prijanjati uz nogu te osigurati dobar kontakt vozača i nogara motocikla. Standard kojim se provjeravaju motociklističke čizme je EN 13634:2002.



Slika 4. Motociklističke čizme [3]

2.3. Rukavice

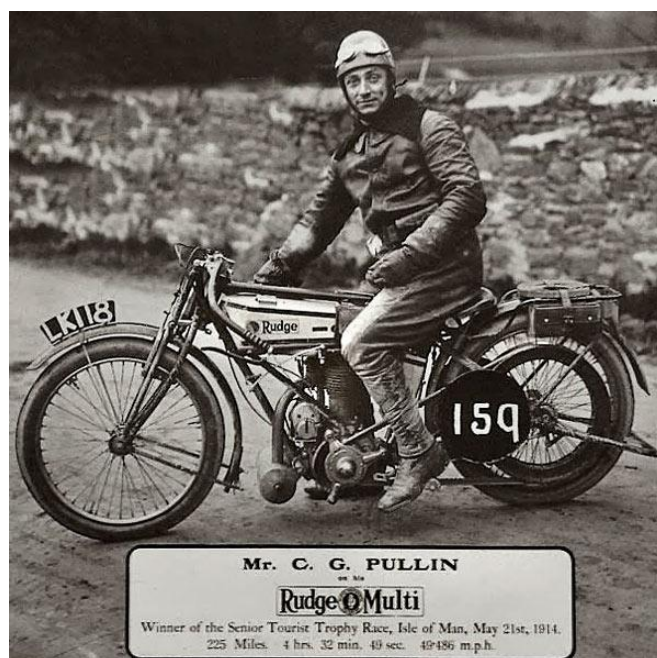
Rukavice su obično izrađene od kože ili tekstila, te su uobičajeno ojačane kompozitnim materijalom od karbonskih vlaknana na zglobovima prstiju. Dlanovi rukavica su zadebljani, što pruža zaštitu od abrazije prilikom proklizavanja. Sporedna uloga motociklističkih rukavica je zaštita od vjetra. Motociklističke rukavice marke IXS možemo vidjeti na slici (Slika 5). Standard kojim se provjeravaju motociklističke rukavice je EN 13594:2002 [3].



Slika 5. Motociklistička rukavica [6]

2.4. Kaciga

Motociklističku kacigu treba navesti kao jedan od važnijih dijelova zaštitne opreme. Neupitno je da one spašavaju ljudske živote, ali njihov razvoj je prošao dug put da bi pružile sigurnost i komfor kakav pružaju danas. Prve motociklističke kacige pojavile su se početkom 20. stoljeća. Bile su izrađene uglavnom od kože, te nisu pružale veliku zaštitu od izravnih udaraca. Primarna svrha bila im je zaštita glave vozača prilikom proklizavanja. Štitile su od abrazije prilikom pada, odnosno struganja kože po podlozi. 1914. godine kacige su postale obvezne na poznatoj utrci *Isle of Man TT*. Organizatori utrke su primjetili značajno povećanje sigurnosti natjecatelja u odnosu na godine prije obaveznog nošenja kacige. Cyril Pullin bio je prvi pobjednik utrke *Isle of Man TT* 1914. godine koji je nosio kožnu kacigu (Slika 6). Treba napomenuti da u to vrijeme šira javnost nije bila obvezna, niti oduševljena idejom obaveznog nošenja kacige.



Slika 6. Cyril Pullin, pobjednik utrke *Isle of Man TT* 1914. godine [7]

Neurokirurg Dr. Hugh Cairns jedan je od prvih koji je izradio studiju o ulozi zaštitne kacige prilikom vožnje motocikla. Na izradu te studije potaknula ga je prometna nezgoda motociklista koji je prilikom pada zadobio teške tjelesne povrede glave koje su bile uzrok smrti. Skupljajući statističke podatke o motociklističkim nezgodama i ozljedama glave sa smrtnim slučajevima, dolazi do zaključka da se smrtnost može drastično smanjiti upotrebom zaštitne kacige. Svoju studiju je objavio 1941. godine u časopisu *British Medical Journal* pod naslovom *Ozljede glave kod motociklista - Važnost zaštitne kacige* (engl. *Head Injuries in Motor-cyclists. The Importance of the Crash Helmet*) [8].

Kako je već naglašeno, povećanjem brzine motocikala, došlo je i do porasta broja nesreća. Pedesetih godina 20. stoljeća prvi put je konstruirana kaciga sa mogućnošću apsorpcije udarca. Konstruirao ju je profesor C.F. Lombard sa sveučilišta Južne Kalifornije. Kaciga se sastojala od čvrste vanjske ljuske s dva sloja podstave. Jedan je služio za komfor pri nošenju kacige, dok je drugi, unutarnji sloj, služio za apsorpciju i raspodjelu energije udarca. Iako prve kacige nisu pružale potpunu zaštitu, označile su novu etapu u izradi motociklističkih kaciga [9].

2.4.1. Tipovi kaciga:

Kacige se dijele na zatvorene, kacige za *motocross*, modularne i otvorene kacige prema [10]. Zatvorena kaciga, (engl. *Full face*) prekriva cijelu glavu, zajedno sa licem i bradom. Takve kacige imaju otvor kod očiju i nosa, te uobičajeno dolaze sa vizikom koji štiti oči od vjetra, prašine i raznih krhotina. Vizir je uglavnom pomičan, te se po potrebi može pomicati, osiguravajući tako pristup licu. Novije kacige ovog tipa imaju prozirne otvore koji pospješuju cirkulaciju zraka kroz kacigu. Glavna odlika ovog tipa kaciga je njihova zaštitna uloga, dok se kao nedostatak često navodi otežano odvođenje topline, nešto veća masa kacige, te osjećaj skučenosti. Primjer zatvorene kacige je kaciga proizvođača Schubert, model C3 Pro (Slika 7).



Slika 7. Zatvorena kaciga [11]

Kaciga za *motocross* ima produženi vizir za sunce i produženo ojačanje za bradu. Dodano ojačanje na bradi pruža veću sigurnost u tom području, a potreba za time javlja se zbog načina vožnje motocross motora, odnosno zahtjevnosti terena. U izvornom obliku ova vrsta kaciga nije imala ojačanje za bradu, već je bila slična otvorenim kacigama namijenjenim cestovnoj vožnji.

Modularne kacige su hibridi između kaciga koje prekrivaju cijelu glavu, odnosno zatvorenih i otvorenih kaciga. Na tom tipu kaciga, zaštita za bradu se podiže i spušta ovisno o potrebi. U spuštenom stanju kaciga nalikuje zatvorenom tipu. Primjer modularne kacige je kaciga proizvođača SHOEI sa nazivom modela NEOTEC (Slika 8). Česti korisnici takvog tipa kaciga su ljudi koji nose naočale iz razloga što im pomicanje zaštite za bradu omogućava skidanje zaštitne kacige, bez skidanja naočala. Nedostatak u odnosu na zatvoreni tip kacige je smanjena zaštita, dok je kao glavna prednost navedena praktičnost.

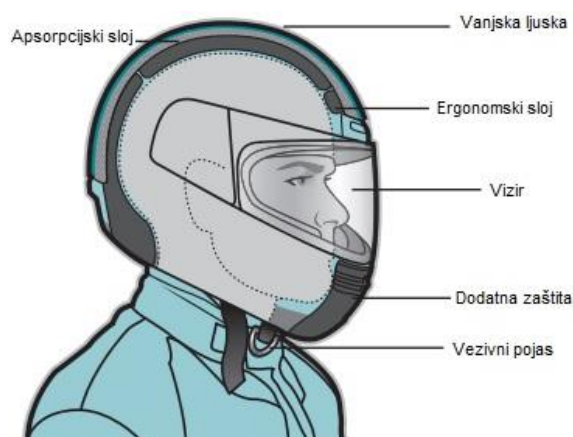


Slika 8. Modularna kaciga u otvorenom položaju [12]

Otvorene kacige pokrivaju uši, obraze, te stražnji dio glave. U odnosu na zatvoreni tip kacige, nedostaje im zaštita za bradu. Ovaj tip kacige pruža dobru zaštitu stražnjeg dijela glave, ali je lice otvoreno za udare vjetra, kiše, krhotina sa ceste. Glavna prednost ovog tipa kacige je upravo otvorenost koja pruža veći osjećaj slobode, dok je nedostatak smanjena zaštita u području lica.

2.5. KONSTRUKCIJA KACIGE

Današnje kacige su višeslojne, gdje svaki sloj ima određenu zadaću. Kao osnovne slojeve motociklističke kacige možemo navesti vanjsku ljusku, apsorpcijski sloj, ergonomski sloj, vizir i sustav za vezivanje (Slika 9). Motociklističke kacige također mogu imati ventilacijske otvore i dodatne polimerne dijelove koji služe kao ojačanja na strateškim mjestima ili poboljšavaju aerodinamiku kacige. Napredkom tehnologije možemo primijetiti sve veću prisutnost integriranih električnih komponenata u motociklističkim kacigama poput slušalica i mikrofona.



Slika 9. Skica kacige s označenim dijelovima [13]

2.5.1. Vanjska ljuska

Vanjski dio kacige uglavnom je izrađen od termoplastike ili vlaknima ojačanog kompozita sa ugljičnim ili staklenim vlaknima. Uloga vanjske ljuske je primiti inicijalni udarac, te njegovu energiju rasporediti na veću površinu.

2.5.1.1. Vanjske ljuske od termoplastike

Vanjske ljuske od termoplastike se uglavnom izrađuju injekcijskim prešanjem. Najčešće upotrebljavani materijal ovih vrsta ljusaka je ABS (engl. *Acrylonitrile butadiene styrene*) zbog svojih dobrih svojstava prilikom udarnog opterećenja [14]. Glavna prednost ove vrste ljusaka je ekonomska opravdanost gdje način proizvodnje uvelike utječe na formiranje cijene. Injekcijskim prešanjem postiže se ravnomjerna debljina ljuske sa odličnom točnošću dimenzija. Kao nedostatak ljusaka izrađenih od ABS-a može se navesti krhkost nakon dužeg izlaganja vanjskim čimbenicima. Također je potrebno napomenuti da za postizanje jednake izdrživosti ljuske na udarno opterećenje, ljuske izrađene od termoplastike moraju imati veću debljinu od kompozitnih ljusaka. Povećanje debljine, negativno utječe na masu ljuske, odnosno povećava ukupnu masu kacige [15]. Prikaz osnovnih svojstava možemo vidjeti u Tablica 1 gdje ρ označava gustoću izraženu u kg/m^3 , ν Poissonov koeficijent, a E označava modul elastičnosti izražen u MPa.

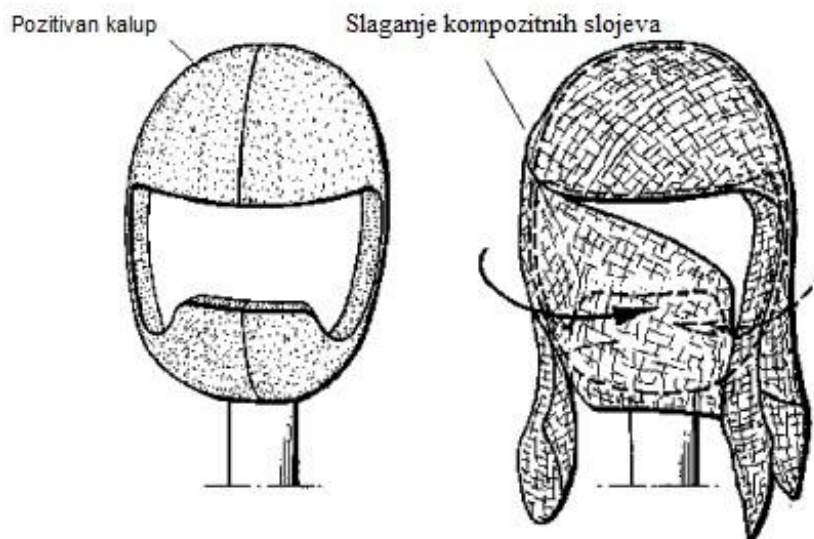
Tablica 1. Mehanička svojstva ABS-a [16]

ρ [kg/m^3]	E [MPa]	ν [-]
1200	4000	0.37

2.5.1.2. Kompozitne ljuske

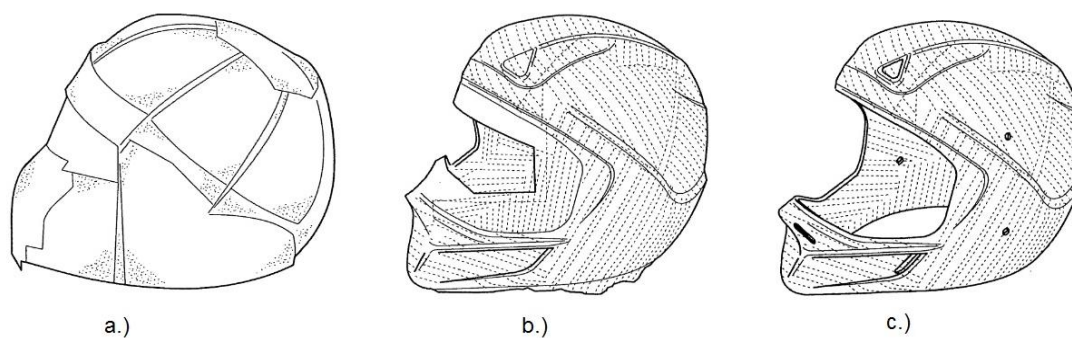
Kompozitne ljuske zaštitnih kaciga su uglavnom izrađene od kompozita koji sadrži staklena, ugljična ili aramidna vlakna, odnosno ojačala. Prednost u odnosu na ljuske izrađene od ABS-a ili PC-a je veća čvrstoća i izdrživost na udarno opterećenje, te manja masa ljuske. Nedostatak je komplicirani proces proizvodnje koji izravno utječe na cijenu takvih kaciga. Uobičajeni način proizvodnje ljusaka od kompozitnih materijala odvija se u nekoliko koraka. Prvi korak je premazivanje kalupa sa sredstvom za odvajanje koje pomaže prilikom odvajanja gotove ljuske od kalupa. Idući korak je postavljanje određenog broja slojeva materijala s definiranim udjelom vlakana i smole na kalup (Slika 10). Nanešeni slojevi se potom umrežavaju.

Proizvodnja kompozitnih ljusaka može se izvoditi i pomoću negativnog kalupa. Nakon skrućivanja kompozitnu ljusku je potrebno dodatno obraditi.



Slika 10. Izrada kompozitne ljuske [15]

Faktori koji utječu na svojstva kompozita su: udio, raspored, dimenzije i oblik i svojstva vlakana, te svojstva matrice. Orijentacija slojeva jedan je od faktora na koji treba obratiti posebnu pozornost prilikom nanošenja slojeva na kalup u proizvodnji (Slika 11). Različitom orijentacijom mijenjaju se svojstva proizvoda [17]

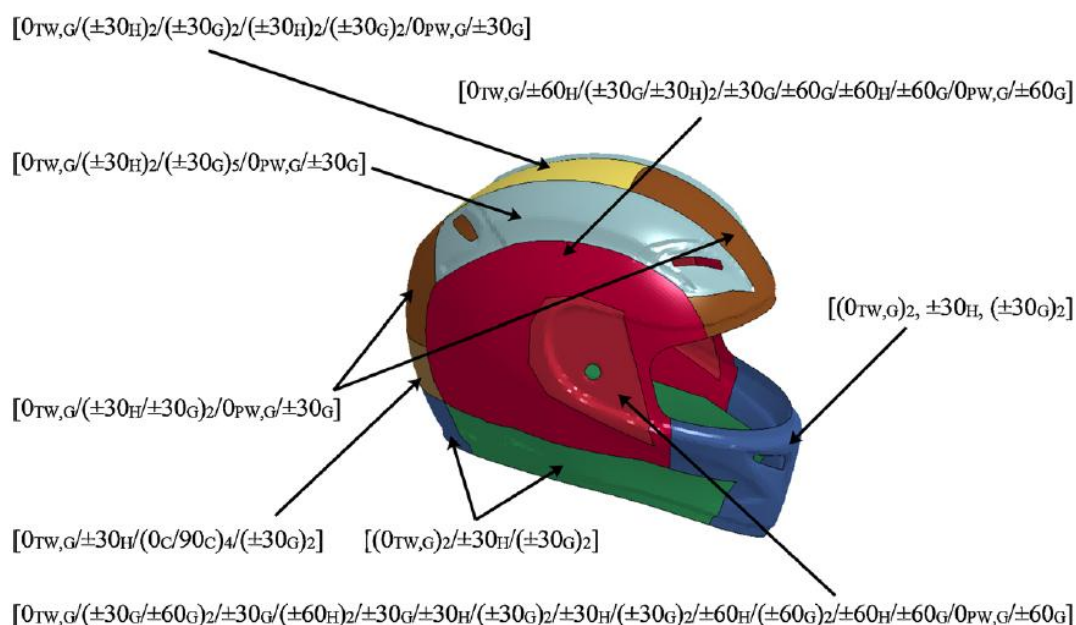


Slika 11. Postupak proizvodnje kompozitne kacige a.) Slaganje kompozitnih listova na kalup, b.) Orijentacija slojeva na neobrađenoj ljusci kacige, c.) Obradena ljuska kacige sa prikazanom orijentacijom slojeva [18]

Odabir orijentacije slojeva može se provesti eksperimentalno ili se provodi numerička analiza. Primjer odabira orijentacije slojeva u kompozitnoj kacigi pronalazimo u [19].

U navedenom radu provodi se iterativni postupak određivanja optimalne orijentacije vlakana u slojevima kompozita u području štitnika brade. Postupak se provodi radi određivanja orijentacije koja najbolje ublažava sile na vrat prilikom udara, a ujedno i zadovoljava ispitni standard ECE R22.05. Izrađen je model kacige koji sadrži vanjsku ljusku, vezivni sustav, te nekoliko dijelova apsorpcijskog sloja. Nakon dodjeljivanja materijalnih svojstava i postavljanja rubnih uvjeta, započeta je simulacija s definiranom orijentacijom kompozitnih slojeva. Nakon provedene analize, postupak se ponavljao s drugačijim rasporedom slojeva radi dobivanja optimalne orijentacije. Orijentacija slojeva varirana je od 0° do 90° , s pomakom od 15° u odnosu na referentnu os. Nakon dobivene optimalne orijentacije vlakana slojeva kompozita, provedena je simulacija udarca u kacigu prema standardu ECE R22.05. Raspored slojeva kojim je postignuta najniža sila u vratu, a ujedno je i zadovoljila ispitivanje provedeno po standardu ECE R22.05 je $[(0)_2, (90)_2, (0)_4]$. Iterirano je 343 slučaja različite orijentacije slojeva, a cijela simulacija trajala je 221 h.

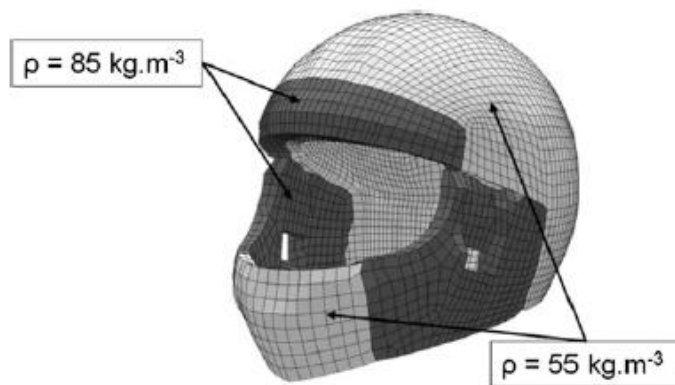
Kompozitna ljuska kacige proizvođača AVG izrađena je od više različitih materijala vlakana poput ugljičnih vlakana (C), staklastih vlakana (G), te hibridnih vlakana ugljika i aramida (H). Prikaz orijentacije kompozitnih slojeva na kacigi proizvođača AGV, model AGV-T2 možemo vidjeti na slici (Slika 12).



Slika 12. Orijentacija vlakana kompozita na različitim dijelovima kacige [19]

2.5.2. Apsorpcijski sloj

Apsorpcijski sloj je vrlo važan u procesu zaštite prilikom udarca. Obično je izrađen od polietilena - PE (engl. *Polyethylene*), polipropilena - PP (engl. *Polypropylene*) ili ekspanziranog polistirena - EPS (engl. *Expandable Polystyrene*). Zbog svojih svojstava i malog troška proizvodnje, EPS je najčešći izbor materijala za apsorpcijski sloj. Ovaj sloj ima ulogu ublažavanja i apsorpcije energije nastalog djelovanjem vanjske sile, odnosno udarca. Prilikom konstruiranja motociklističke kacige uobičajeno se koristi apsorpcijski sloj izrađen iz više dijelova. Dijelovi apsorpcijskog sloja razlikuju se u mehaničkim svojstvima i debljini sloja. Debljina apsorpcijskog sloja varira od 10 - 45 mm, ovisno o području na kojem se nalazi. Područje obraza i brade sadrži tanje slojeve, čija se debljina kreće u rasponu od 10- 20 mm. Na području tjemena debljina apsorpcijskog sloja može iznositi do 45 mm. Kao primjer može se navesti korištenje EPS-a različite gustoće za područje obraza, te brade i tjemnog dijela apsorpcijskog sloja (Slika 13). Navedeni primjer korišten je prilikom numeričke analize ispitivanja motociklističke kacige u [20]. Numerička analiza navedenog rada provedena je pomoću programa LS-DYNA, a prikaz usporedbe osnovnih mehaničkih svojstava EPS-a različite gustoće možemo vidjeti u tablici (Tablica 2).



Slika 13. Različite gustoće apsorpcijskog dijela kacige [20]

Tablica 2. Usporedba osnovnih mehaničkih svojstava EPS-a različite gustoće [20]

	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	ν [-]
EPS 55	55	15	0,01
EPS 85	85	28	0,01

2.5.3. Ostale komponente kacige

2.5.3.1. Ergonomski sloj

Kako je već napomenuto, uloga vanjske ljuske i apsorpcijskog sloja je primiti inicijalni udarac i rasporediti ga na što veću površinu, te apsorbirati energiju udara. Koristeći samo ta dva sloja, motociklističke kacige bile bi vrlo neudobne za nošenje, te se između glave i apsorpcijskog sloja postavlja ergonomski sloj. Uloga ergonomskog sloja motociklističke kacige je osigurati dobro prijanjanje uz lice i glavu vozača, te pružiti komfor prilikom nošenja kacige. Unutrašnji ergonomski slojevi kaciga uglavnom su izrađeni od poliuretanske pjene - PU (engl. *Polyurethane*) obložene tkaninom. Zbog dodira s kožom vozača važno je da podstava ne izaziva iritaciju. Kako bi se održala higijena, današnje kacige imaju djelomično odvojivu podstavu. Na Slika 14 je prikazana kompletna podstava motociklističke kacige s polimernim dijelovima koju služe za povezivanje ergonomskog sloja i ostatka kacige.



Slika 14. Ergonomski sloj motociklističke kacige [21]

2.5.3.2. Sustav za vezivanje

Uloga sustava za vezivanje je osigurati pravilan položaj kacige na glavi vozača prilikom pada. Pričvršćen je sa svake strane za ljusku kacige, a osigurava se pritezanjem ispod brade. Sustav za vezivanje podvrgava se ispitivanju prema propisanom standardu.

2.5.3.3. Sustav za ventilaciju

Sustav za ventilaciju uvelike utječe na kvalitetu kacige, odnosno zadovoljstvo korisnika. Dobra ventilacija kacige osigurava bolje odvođenje topline, što za korisnika znači ugodnije iskustvo nošenja kacige i vožnje. Standardi za ispitivanja kaciga usredotočeni su na sigurnost, što znači da će, neovisno o cijeni, kacige sa zadovoljavajućom ocjenom pružiti potrebnu zaštitu prilikom udara. Razlika u cijeni kaciga je definirana drugim parametrima poput mase, aerodinamike, dizajna i sustava za ventilaciju. Prikaz izmjene zraka pomoću sustava za ventilaciju može se vidjeti na Slika 15.



Slika 15. Izmjena zraka pomoću sustava za ventilaciju [21]

2.5.3.4. Vizir

Uloga vizira je zaštita vozača od vjetra, prašine, insekata, te UV zračenja sunca. Viziri se također podvrgavaju ispitivanjima prema propisanim standardima. Ispitivanje mehaničkih svojstava jedno je od ispitivanja koje se provodi. Prema ECE R22.05 standardu ispitivanje se provodi na način da se kaciga sa spuštenim vizikom postavlja na podlogu u poziciju koja omogućuje utegu da okomito udari u vizir. Za ispitivanje se koriste dva utega različite mase, pri čemu uteg cilindričnog oblika i veće mase udara u uteg manje mase i stožastog oblika. Uteg stožastog oblika potom udara u vizir. Ispitivanje je zadovoljeno ukoliko nakon puknuća vizira ne nastaju krhotine sa vrhom kuta manjim od 60°. Drugi uvjet zadovoljavanja ispitivanja je mjerenje dubine penetracije manjeg stožastog utega pri čemu se uteg mora zaustaviti minimalno 5 mm od umjetne glave unutar kacige [22].

3. STANDARDI ZA ISPITIVANJE KACIGA

Motociklistička kaciga ključan je dio motociklističke zaštitne opreme što zahtjeva kontinuiranu kontrolu i pouzdanost u smislu sigurnosti. Sigurnost motociklističke kacige potvrđuju ovlaštena ispitna tijela koja, slijedeći propisane standarde i pravilnike, ispituju kacige. Postoji više priznatih standarda za ispitivanje kaciga, a primjena određenog standarda zakonom propisuje država. Sve kacige koje se koriste u prometu moraju biti homologirane. Neki od standarda su: DOT, Snell M2015 i ECE R22.05. Svaki od spomenutih standarda zahtjeva korištenje propisanog modela glave prilikom ispitivanja.

DOT (engl. *Department of Transport*) standard se primjenjuje na području Sjedinjenih Američkih Država. Za dobivanje DOT certifikata, potrebno je zadovoljiti niz različitih uvjeta i ispitivanja. Jedno od ispitivanja je apsorpcija energije udarca kacige pri točno definiranim uvjetima. Uređaj na kojemu se vrši ispitivanje osigurava vođeni pad kacige. Kaciga propisanom brzinom udara u nakovanj koji dolazi u dva oblika, kao ravan ili zakrivljeni. Pri ispitivanju apsorpcije energije udarca mjeri se akceleracija umjetne glave unutar kacige. Standard dozvoljava maksimalnu akceleraciju od 400 g. Neki od primjera ostalih ispitivanja koje propisuje DOT standard su ispitivanje vezivnog sustava, penetracija ispitnog udarača u kacigu, ispitivanje zakretanja kacige [23].

Snell Memorial Foundation utemeljena je 1957. godine i djeluje kao neprofitna organizacija čiji je cilj poboljšanje sigurnosti kaciga kroz znanstvena istraživanja i ispitivanja. Proizvođači kaciga nisu dužni podvrgnuti svoje kacige Snell ispitivanjima, već to čine dobrovoljno, što im u slučaju zadovoljavajuće ocjene daje međunarodno priznati Snell certifikat. Ispitivanja za dobivanje Snell certifikata rigoroznija su u pogledu postavljenih zahtjeva za zadovoljavanje standarda u odnosu na ostale standarde (DOT, ECE R22.05). Prilikom ispitivanja apsorpcije energije udara, za razliku od ECE R22.05 standarda, u Snell metodi ispituje se dvostruki udar u kacigu na isto mjesto. Uz ispitivanje apsorpcije energije udarca, ispituje se sustav za vezivanje kacige, otpornost na probijanje vanjske ljuske, čvrstoća štitnika za donji dio lica, penetracija vizira. U slučaju ispitivanja kaciga namijenjenim utrkama, ispituje se i otpornost na plamen. Kaciga se izlaže plamenu na određeni broj sekundi, a ukoliko dođe do zapaljenja, plamen se mora samostalno ugasiti. Pri ispitivanju otpornosti na plamen temperatura unutar kacige ne smije prijeći zadanu vrijednost [26]. U nastavku će biti opisan pravilnik ECE R22.05 po kojem je provedena numerička analiza udarca u kacigu.

3.1. ECE R22.05 [22]

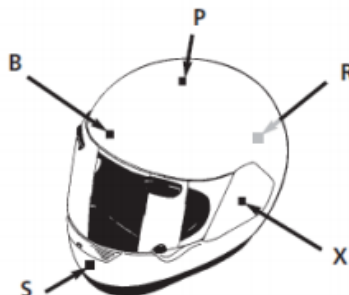
Ekonomska Komisija za Europu - ECE (engl. *Economic Commission for Europe*) osnovana je 1958. godine pod pokroviteljstvom Ujedinjenih Naroda, te je sklopljen "Sporazum o prihvaćanju jednakih tehničkih propisa za vozila na kotačima, opremu i dijelove koji mogu biti ugrađeni i/ili upotrijebljeni u vozilima na kotačima i uvjetima za uzajamno priznavanje homologacija dodijeljenih na temelju tih propisa". Temeljem tog sporazuma postavljeni su uvjeti za ujednačavanje zahtjeva za testiranje kaciga u zemljama potpisnicama sporazuma. Ispitivanja koja propisuje standard ECE R22.05 može se podijeliti na dvije skupine:

- razorna ispitivanja: apsorpcija energije udarca, ispitivanje kacige na abraziju, test krutosti kacige, mehanička svojstva vizira, otpornost vizira na ogrebotine;
- nerazorna ispitivanja: izlaganje kacige različitim uvjetima, dinamička izdržljivost i proklizavanje vezivnog sustava, ispitivanje zakretanja kacige, provjera vidnog polja kacige, raspršivanje svjetla, prepoznavanje svjetlosnih signala, prozirnost vizira i vidljivost spektra boja, indeks loma svjetlosti.

3.1.1. Apsorpcija energije udarca

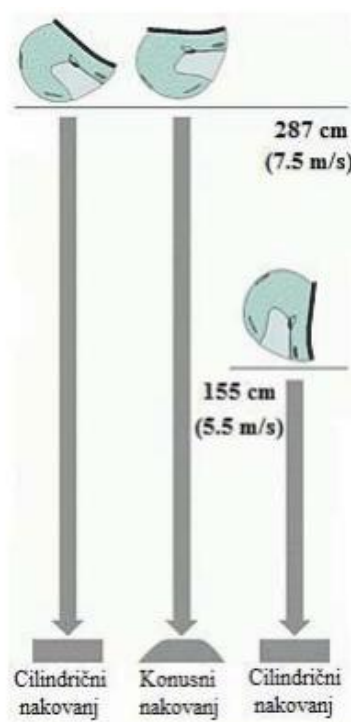
Ispitivanje apsorpcije energije udarca u standardu ECE R22.05 slična je DOT standardu. Uključuje puštanje kacige da slobodno pada prema nakovnju. Točke udara u kacigu su propisane, a točka S uzima se u obzir u slučaju postojanja zaštite donjeg dijela lica (Slika 16):

- točka B nalazi se na prednjem dijelu kacige iznad otvora za vizir;
- točka P nalazi se na vrhu kacige;
- točka R na zatiljnom dijelu;
- točka X na lijevoj ili desnoj strani kacige;
- točka S na dijelu kacige koji služi za zaštitu donjeg dijela lica.



Slika 16. Označene točke udara u kacigu [22]

Brzina kojom kaciga mora udariti u nakovanj kao i oblik i dimenzije nakovnja, također su propisani. Brzina za udarac u cilindrični i konusni nakovanj iznosi 7,5 m/s. Propisana brzina mjeri se na udaljenosti od 10 mm do 60 mm od nakovnja. Ukoliko kaciga sadrži i zaštitu donjeg dijela lica, ECE R22.05 standard propisuje način ispitivanja tog dijela. Brzina koju kaciga mora postići slobodnim padom u tom slučaju iznosi 5,5 m/s, a nakovanj je cilindričan. Masa ispitne glave također je propisana standardom, a određuje se prema veličini kacige.



Slika 17. Brzine udara kacige u nakovanj pri ispitivanju [22]

1972 godine Administracija za sigurnost u prometu NHTSA (engl. *National Highway Traffic Safety Administration*) predložila je Kriterij ozljede glave, HIC (engl. *Head Injury Criterion*). Zadovoljavanje ispitivanja apsorpcije udarca ocjenjuje se pomoću vrijednosti ubrzanja i HIC kriterija. Ubrzanje se mjeri akcelerometrom postavljenim unutar ispitne glave, a iznos akceleracije ne smije prijeći vrijednost od 275 g. Vrijednost HIC ne smije prijeći 2400. Izraz kojim se računa HIC predstavljen je u jednadžbi (1), gdje t_1 označava početak udara, odnosno prvi dodir kacige i nakovnja, a t_2 označava kraj dodira.

$$\text{HIC} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

3.1.2. Ispitivanje krutosti kacige

Prilikom ispitivanja krutosti, kacigu je potrebno postaviti između dvije paralelne ploče. Kaciga se opterećuje približavanjem paralelnih ploča. Minimalna brzina kojom se ploče pomiču ne smije biti manja od 20 mm/min. Početna sila iznosi 30 N. Takvo stanje održava se 2 minute, nakon čega se mjeri udaljenost između ploča. Sila se povećava za 100 N, nakon čega se stanje ponovno održava 2 minute i mjeri udaljenost između ploča. Postupak se ponavlja dok se ne postigne iznos od 630 N. Pri maksimalnom opterećenju pomak ploča ne smije biti veći od 40 mm.

3.1.3. Dinamička izdrživost vezivnog sustava

Jedno od ispitivanja vezivnog sustava je dinamička izdrživost. Ispitivanje se provodi na način da se kaciga postavi na umjetnu glavu koja je povezana vodicama i uređajem za mjerenje pomaka glave s tim da je kaciga učvršćena u tjemenu dijelu. Masa umjetne glave i vodilica iznosi 15 kg što odgovara masi predopterećenja. Idući korak je dodavanje utega mase 10 kg koji se povezuje s umjetnom glavom. Dodani uteg pušta se slobodnim padom sa visine od 750 mm. Mjeri se pomak glave nakon slobodnog pada utega. Pomak ne smije iznositi više od 35 mm. Uklanjanjem dodanog utega, mjeri se pomak glave od kacige koji ne smije iznositi više od 25 mm.

3.2. Ispitne glave

Ispitne glave korištene za ispitivanja motociklističkih kaciga propisane su određenim standardima. Standardi koji se koriste su DOT ili ISO, ovisno o zemlji u kojoj se vrši ispitivanje. Glave oba standarda su čvrste, ali se razlikuju u veličini, obliku i masi (Slika 18). Unutar glava nalazi se akcelometar koji mjeri akceleraciju pomoću koje se određuje HIC. Umjetne glave izrađene su od različitih materijala, poput drveta ili magnezijevih legura. Materijal ispitne glave ovisi o vrsti ispitivanja.



Slika 18. Različite veličine glava prema standardima a) DOT, b) ISO/EN960 [24]

3.3. Usporedba standarda

Usporedba standarda je radi preglednosti prikazana Tablica 3.

Tablica 3. Usporedba standarda [25]

STANDARD	M2010/2015	DOT	ECE 22.05
Ispitne glave			
Opseg [cm]	ISO/EN 960	DOT	ISO/EN 960
50 - 51,9	3,1 kg (A)	3,5 kg (S)	3,1 kg (A)
52 - 53,9	3,6 kg (C)		
54 - 56,9	4,1 kg (E)	5,0 kg (M)	4,1 kg (E)
57 - 59,9	4,7 kg (J)		4,7 kg (J)
60 - 61,9	5,6 kg (M)	6,1 kg (L)	5,6 kg (M)
62	6,1 kg (O)		6,1 kg (O)
Udarni uvjeti			
Ravan nakovanj	Dva udara 1. 7,75 m/s	Dva udara 6,0 m/s	Jedan udar 7,5 m/s
Polukružni nakovanj	2. 7,09 m/s, A, C, E 2. 6,78 m/s, J 2. 5,73 m/s, M 2. 5,02 m/s, O	Dva udara 5,2 m/s	/
Konusni nakovanj	/	/	Jedan udar 7,5 m/s
Kutni nakovanj	Jedan udar 7,75 m/s	/	/
HIC	/	/	2400
Maksimalni g	275 A, C, E, J 264 m 243 O	400	275
Vezivni sustav			
Dinamička izdrživost vezivnog sustava	23 kg statičko, 38 kg x 120 mm dinamičko, 30 mm kriterij	22,68 kg osnova, 131,54 statičko opterećenje, 25,4 mm kriterij	15 kg statičko, 10 kg x 750 mm dinamičko, 35 mm kriterij
Zahtjevi na vanjsku ljusku			
Probijanje ljuske	Konus od 60°, 3kg, 3 m visine	Konus od 60°, 3kg, 3 m visine	/
Krutost ljuske	/	/	30 N početno, vremenski interval 2 min, 630 N konačno 40 mm kriterij
Polje vidljivosti			
Lateralno	>210°	>210°	>210°

4. NUMERIČKI MODEL

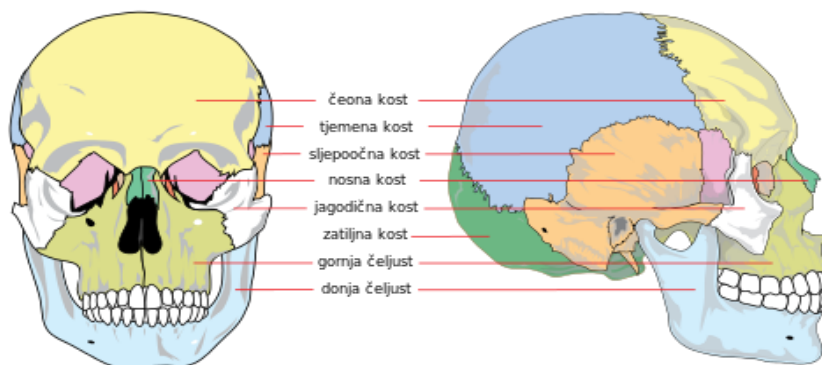
4.1. Anatomija glave

4.1.1. Lubanja

Primarna uloga lubanje je zaštita mekog tkiva unutar glave poput mozga ili očiju. Lubanja također pruža potporu mekim tkivima i ujedno služi kao mjesto hvatišta mišićnog tkiva prekrivenog kožom. Zbog svoje primarne uloge lubanja se odlikuje velikom čvrstoćom, a sastavljena je iz tri sloja kostiju. Unutarnji i vanjski sloj kosti čini kompaktna kost, dok se između nalazi spužvasta kost. Ljudska lubanja se sastoji od 22 kosti od kojih je 21 kost čvrsto spojena. Jedina pomična kost u ljudskoj lubanji je donja čeljust. Ona je spojena sa sljepoočnom kosti pomoću zgloba. Kosti u ljudskoj lubanji su uglavnom pločaste, te zajedno omeđuju prostor unutar kojeg je smješten mozak. Neurokranij je naziv za kosti unutar kojih je smješten mozak, a čine ga 8 kostiju lubanje. Naziv za kosti lica je viscerokranij, a čine ga 14 kostiju. Popis kostiju lubanje nalazi se u Tablica 4. Na Slika 19 prikazan je položaj pojedinih kosti na ljudskoj lubanji.

Tablica 4. Popis kostiju lubanje [27]

NEUROKRANIJ	VISCEROKRANIJ
– Zatiljna kost, <i>os occipitale</i>	– Sitasta kost, <i>os ethmoidale</i>
– Klinasta kost, <i>os sphenoidale</i>	– 2 nosne kosti, <i>os nasale</i>
– Čeona kost, <i>os frontale</i>	– 2 kosti donje nosne školjke, <i>concha nasalis inferior</i>
– 2 tjemene kosti, <i>os parietale</i>	– Raonik, <i>vomer</i>
– Kosti fontanela	– 2 jagodične kosti, <i>os zygomaticum</i>
– 2 sljepoočne kosti, <i>os temporale</i>	– 2 nepčane kosti, <i>os palatinum</i>
	– 2 kosti gornje čeljusti, <i>maxilla</i>
	– Donja čeljust, <i>mandibula</i>



Slika 19. Kosti ljudske lubanje [28]

4.1.2. *Moždane ovojnice*

Moždane ovojnice obavijaju mozak i nalaze se ispod lubanje. Imaju ulogu zaštite mozga, služe kao potpora krvnim žilama, te zatvaraju prostor ispunjen tekućinom. Moždane ovojnice možemo podijeliti u tri sloja: *dura mater*, *arachnoidea mater* i *pia mater*. *Dura mater* je opna koja obuhvaća strukture živčanog sustava smještene unutar lubanje. Čvrsto je povezana s lubanjom, dok se u kralježničnom kanalu između dure mater i kralježaka nalazi sloj masnog tkiva. *Dura mater* svojim podvostručenjem dijeli mozak na lijevu i desnu polutku. Podvostručenje dure mater naziva se *falx cerebri*. Drugo podvostručenje dure mater naziva se *falx cerebelli* i ono dijeli mali mozak na dvije polutke. Pregrada koja podjeljuje mali i veliki mozak naziva se *tentorium cerebelli*. *Dura mater* možemo okarakterizirati kao čvrstu, žilavu i teško poderivu ovojnicu. Cerebrospinalni likvor je bezbojna, bistra tekućina koja se luči u moždane ventrikle i subarahnoidni prostor. Služi kao zaštita središnjeg živčanog sustava od djelovanja raznih opterećenja, naglim promjenama tlaka. *Arachnoidea mater* je paučinasta ovojnica, srednji sloj koji sadržava fibroblaste, kolagenska vlakna i malo elastičnih vlakana. Nije izravno pričvršćena za *dura mater* već se za nju drži pomoću tlaka cerebrospinalne tekućine. *Pia mater* je unutrašnji tanki sloj. Prošarana je mrežom finih krvnih žila i prijanja uz površinu mozga te prati njegove obrise. Naziva se hranidbenom ovojnicom mozga [29].

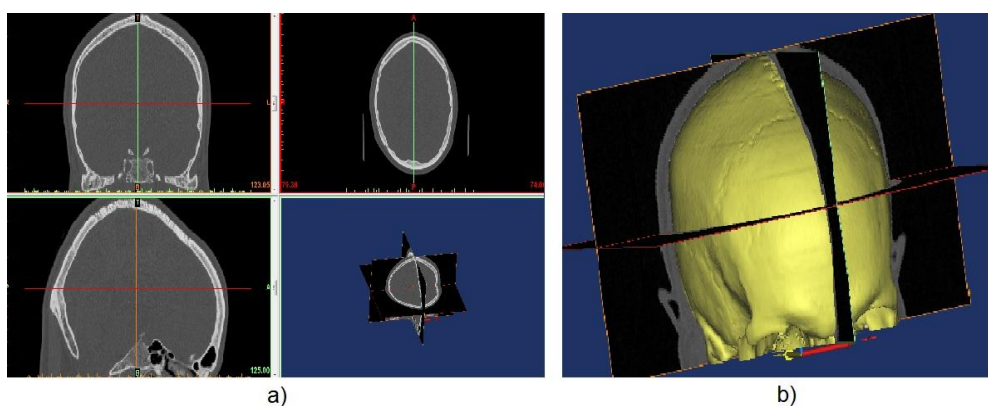
4.1.3. *Mozak*

Ljudski mozak jedan je od vitalnih organa. On je centralni dio živčanog sustava. Mozak prima razne informacije, te nakon obrade šalje upute izvršnim organima. Nalazi se unutar lubanje, obavljen moždanim ovojnicama. Dijelovi mozga su: mali mozak, veliki mozak, moždano deblo koje obuhvaća produljenu moždinu. Mali mozak služi za ostvarivanje automatskih i voljnih pokreta. Možemo reći da je on kontrolni koordinacijski organ središnjeg živčanog sustava. Veliki mozak se sastoji od dvije hemisfere, odnosno dvije moždane polutke koje su povezane u središnjoj liniji. Mozak je također podijeljen na režnjeve: čeonu režu, tjemeni režu, slijepoočni režu i zatiljni režu. Površina mozga građena je od sive moždane tvari, te je izbrazdana plitkim i dubokim brazdama, čime se površina mozga znatno povećava, bez povećanja volumena lubanje. Masa mozga odraslog čovjeka, u prosjeku, iznosi oko 1,4 kg. Unutar mozga nalaze se četiri komore, odnosno ventrikula u kojima nastaje cerebrospinalni likvor [30].

4.2. Numerički model glave

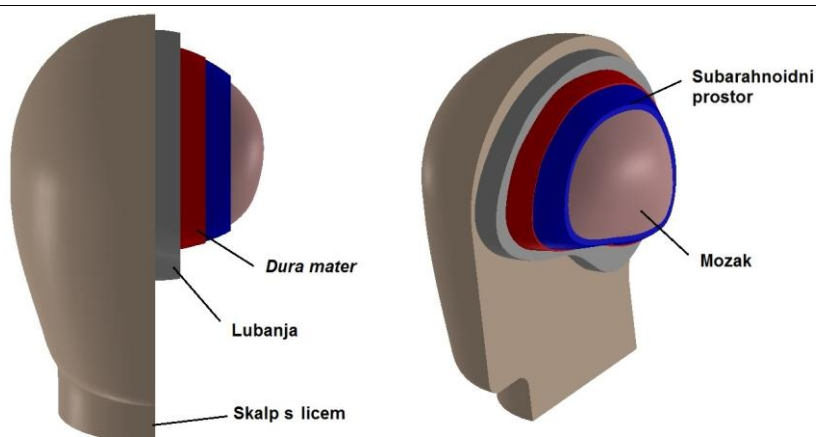
Prije modeliranja glave i njenih dijelova, izrađen je 3D model lubanje iz CT snimaka odrasle muške osobe, za što je korišten računalni program Materialise Mimics. Mimics je akronim za *Materialise Interactive Medical Image Control System*. Materialise Mimics je razvijen u Belgiji, a specijaliziran je za obradu slika i izradu 3D modela. Područja primjene Materialise Mimics programa sežu od autoindustrije, preko arhitekture pa do medicinske upotrebe. Za izradu 3D modela, program koristi niz 2D slika. Mimics može koristiti niz datoteka s različitim ulaznim formatima, dok se za izlazni format odabire jedan od ponuđenih, ovisno o željenoj primjeni [31].

Nakon učitavanja CT snimaka, dobiveni su obrisi lubanje u tri ravnine podijeljene po slojevima. Nakon njihove grube obrade, generiran je 3D model, koji je korišten kao geometrijska referenca za modeliranje i dobivanje konačnog modela lubanje (Slika 20).



Slika 20. a) Obrada CT snimaka u Materialise Mimics programu, b) 3D model generiran u Materialise Mimics-u

3D model dobiven iz CT snimaka spremljen je kao STL format, radi mogućnosti učitavanja u računalni program SolidWorks. Nakon završenog modeliranja glave, korištenjem računalnog programa Abaqus/Explicit je u ovom diplomskom radu izvršena usporedba dobivenih rezultata s eksperimentalnim i numeričkim rezultatima iz [32]. Ovjereni model glave korišten je kao ispitna glava u daljnjoj numeričkoj analizi. Modelirana glava značajno je pojednostavljena zbog složenosti i nepravilnosti ljudske glave. Modelirani dijelovi su skalp sa licem, lubanja, *dura mater*, subarahnoidni prostor sa cerebrospinalnom tekućinom i mozak. Na Slika 21 su označeni dijelovi u presijeku modelirane glave.



Slika 21. Dijelovi numeričkog modela glave u presijeku

Iako je model glave simetričan, za provedbu numeričke analize korišten je cijeli zbog nesimetrije materijalnog modela kompozitne ljuske kacige, odnosno orijentacije slojeva. Povezanost svih dijelova modela glave ostvarena je kinematskom vezom *Tie* koja sprječava odvajanje dodirnih površina. Svi dijelovi glave modelirani su linearnim tetraedarskim konačnim elementima C3D4. Pregled mreža konačnih elemenata pojedinih dijelova i cjelokupnog modela glave prikazan je u Tablica 5. Mozak je diskretiziran s tri mreže koje su korištene u modelu glave pri numeričkim simulacijama. Različite gustoće mreža korištene su radi provjera konvergencija rješenja. Promjena broja elemenata u ukupnom modelu ovisi o gustoći mreže mozga.

Tablica 5. Pregled diskretizacije konačnim elementima pojedinih dijelova i cijelog modela glave

		Tip elementa	Broj elemenata	Broj čvorova
Skalp s licem		C3D4	62314	13095
Lubanja		C3D4	21406	5458
<i>Dura mater</i>		C3D4	24375	7985
Subarahnoidni prostor		C3D4	10853	3533
Mozak	Mreža 1	C3D4	30197	5895
	Mreža 2		46199	8821
	Mreža 3		67314	12718
Cjelokupni model glave	Mreža 1	C3D4	148812	35966
	Mreža 2		164734	38892
	Mreža 3		185929	42789

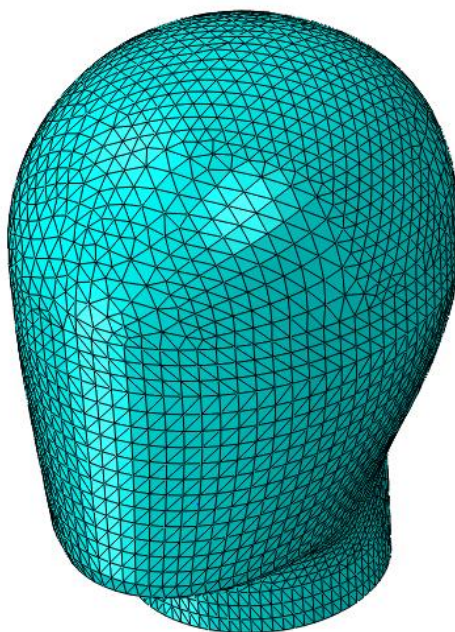
4.2.1. Numerički model skalpa s licem

Vanjski dio glave modeliran je da oblikom sliči ispitnoj glavi prema standardu ISO/EN 960. Unutarnja površina opisuje vanjsku konturu lubanje. Kostí lica nisu modelirane zbog načina izvođenja simulacija udara. Prilikom usporedbe modela glave s ovjerenim numeričkim modelom, simulira se udarac u čeonu kost koja je dovoljno udaljena od donjeg dijela glave, dok se pri simulaciji udarca u kacigu udara u tjemenu dio. Simulacija udarca u području frontalnog dijela lica zahtjevala bi promjenu modela sa detaljnijim značajkama tog područja. Masa vanjskog dijela glave iznosi 2,29 kg. Za modeliranje vanjskog dijela glave korišten je linearno elastični materijalni model s materijalnim svojstvima danim u Tablica 6 [32].

Tablica 6. Mehanička svojstva vanjskog dijela glave [32]

ρ [kg/m ³]	m [kg]	E [MPa]	ν [-]
1000	2,29 kg	16,7	0,42

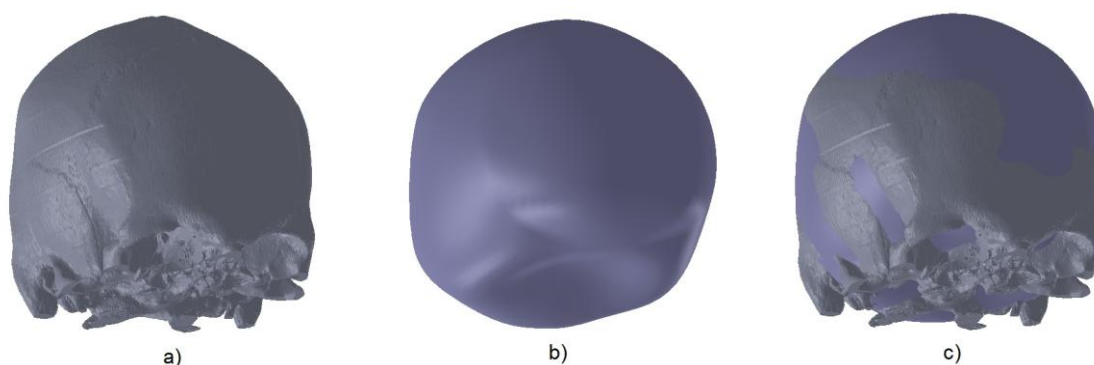
Na Sliku 22 je prikazana mreža konačnih elemenata na vanjskom dijelu glave.



Slika 22. Vanjski dio glave diskretiziran konačnim elementima tipa C3D4

4.2.2. Numerički model lubanje

Uvođenjem generiranog 3D modela dobivena su geometrijska ograničenja, koja ocrtavaju vanjsku i unutarnju konturu lubanje. Kako je već naglašeno, zbog kompleksnog oblika i mnogih nepravilnosti ljudske lubanje, poput asimetrije, uvedena su pojednostavljenja. Modelirana lubanja je simetrična, pri čemu je korišteno modeliranje pomoću površina (engl. *Surface modeling*). Modelirane su površine koje približno opisuju unutarnji i vanjski obris uvedenog 3D modela. Na Slika 23 je prikazan model lubanje izrađen iz CT snimaka, modelirana, pojednostavljena lubanja, te prikaz podudarnosti modeliranog i generiranog modela. Radi isticanja razlike između CT i modeliranog modela, korištena je nijansa ljubičaste boje za modeliranu lubanju.



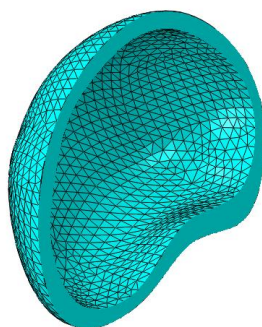
Slika 23. Model lubanje: a) lubanja izrađena pomoću CT snimaka, b) površinama modelirana lubanja, c) podudarnost modela

Pojednostavljenje modela primjenjeno je i prilikom određivanja strukture kosti. Cijela lubanja modelirana je iz jednog sloja kompaktne kosti gustoće 1900 kg/m^3 . Materijalni model lubanje je linearno elastičan. Masa modelirane lubanje iznosi 1,27 kg, što je više od prosječnih 1 kg. Veća masa proizlazi iz pojednostavljenja geometrije, kao i zanemarivanja spužvaste kosti. Korištena mehanička svojstva lubanje prikazana su u Tablica 7.

Tablica 7. Mehanička svojstva lubanje [32]

$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$m \text{ [kg]}$	$E \text{ [MPa]}$	$\nu \text{ [-]}$
1900	1,27	15000	0,21

Na Slika 24 prikazana je polovica modela lubanje, ali je u numeričkim simulacijama korišten cijeli model.



Slika 24. Presjek modelirane lubanje sa prikazanim C3D4 elementima

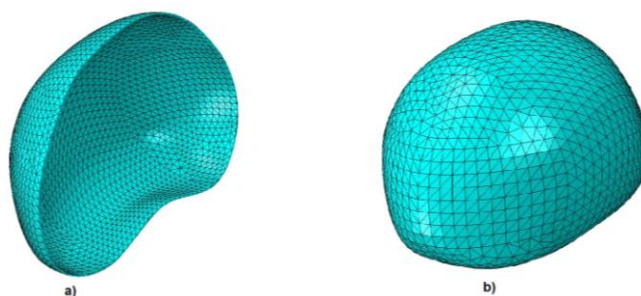
4.2.3. Numerički model dure mater i subarahnoidnog prostora

Dura mater pripijena je uz unutrašnju stijenku lubanje i jednolike je debljine od 1 mm. Masa *dure mater* iznosi 0,074 kg. Za modeliranje *dure mater* korišten je linearno elastičan materijalni model prema [33]. *Dura mater* i *falx cerebri* posjeduju ista mehanička svojstva iz razloga što je *falx cerebri* podvostručenje ovojnice *dure mater*.

Arachnoidea mater i *pia mater* radi pojednostavljenja nisu modelirane, već je između ovojnice *dure mater* modeliran subarahnoidni prostor u kojemu se nalazi cerebrospinalna tekućina. Subarahnoidni prostor je ovojnica jednolike debljine stijenke od 3 mm koja prijanja uz ovojnicu *dure mater*. Masa subarahnoidnog prostora iznosi 0,191 kg. Mehanička svojstva za *dure mater* i subarahnoidni prostor preuzeta su iz [32] i prikazana su u Tablica 8. Na Slika 25 prikazana je mreža konačnih elemenata a) polovice modela *dure mater* i b) cijelog modela subarahnoidnog prostora

Tablica 8. Mehanička svojstva *dure mater* [32]

	ρ [kg/m ³]	m [kg]	E [MPa]	ν [-]
Dura mater	1140	0,074	31,5	0,45
Subarahnoidni prostor	1040	0,191	0,012	0,49



Slika 25. Mreža konačnih elemenata: a) polovica modela *dure mater*, b) subarahnoidni prostor

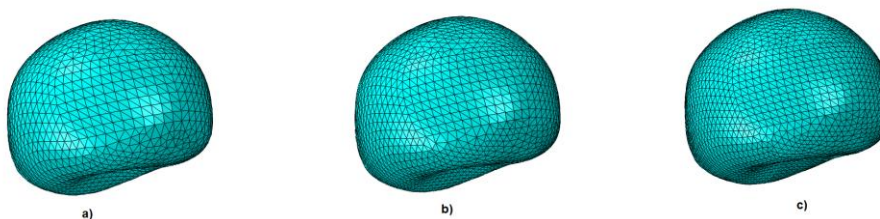
4.2.4. Numerički model mozga

Preostali dio šupljine koju zatvara subarahnoidni prostor popunjen je modelom mozga. Mozak je modeliran kao jedno tijelo, bez podjela na lijevu i desnu polutku. Mali mozak, moždano deblo i ventrikuli mozga također nisu modelirani radi pojednostavljenja modela. Tokom udarnog opterećenja mozak je izložen različitim vrstama naprezanja poput tlaka, vlaka i smika. Poznavanje mehaničkih svojstava moždanog tkiva, omogućava korištenje numeričkih simulacija za predviđanje pojava ozlijeda mozga. Prilikom jednoosnog vlačnog ispitivanja utvrđeno je da mozak pokazuje krući odaziv pri većim naprežanjima iz čega je izvučen zaključak o potrebi korištenja viskoelastičnog materijalnog modela [34]. Mehanička svojstva mozga preuzeta su iz literature [34] i prikazana su u Tablica 9. *Prony* parametri \bar{g}_i^P , \bar{k}_i^P , τ_i se u programu Abaqus koriste za određivanje viskoelastičnih svojstava u vremenskoj domeni [39]. \bar{g}_i^P označava smični modul opuštanja (engl. *Shear Relaxation Modulus*), \bar{k}_i^P volumni modul opuštanja (engl. *Bulk Relaxation Modulus*), a τ_i vrijeme opuštanja (engl. *Relaxation Time*).

Tablica 9. Mehanička svojstva mozga [34]

ρ [kg/m ³]	m [kg]	E [MPa]	ν [-]	\bar{g}_i^P [-]	\bar{k}_i^P [-]	τ_i [s]
1140	1,44	0,01	0,49	0,5837	0,2387	0,02571

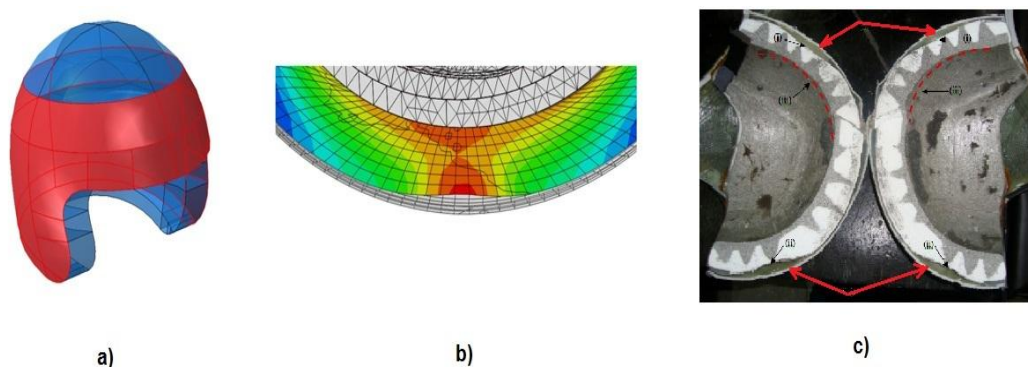
Za validaciju numeričkog modela i provjeru konvergencije rješenja modela glave sa provjerenim modelom iz [32], korištene su tri različite gustoće mreže. Korišteni su linearni tetraedalni konačni elementi tipa C3D4. Najrjeđa mreža se sastoji od 30197 C3D4 konačna elementa sa 5895 čvorova. Mreža srednje gustoće sastoji se od 46119 C3D4 konačna elementa sa 8821 čvora, dok se najgušća mreža sastoji od 67314 C3D4 konačna elementa sa 12718 čvorova. Mreže su označene brojevima od 1 do 3 s time da je najrjeđa mreža označena brojem 1 (Slika 26). Rezultati validacije numeričkog modela mozga opisani su u poglavlju 5.



Slika 26. Različite gustoće mreža modela mozga: a) mreža 1, b) mreža 2, c) mreža 3

4.3. Numerički model kacige

Model kacige modeliran je površinama u računalnom programu SolidWorks 2017. Model se sastoji od vanjske kompozitne ljuske i unutrašnjeg apsorpcijskog sloja. Izostavljeni su dijelovi ergonomskog sloja, vezivni sustav, te sustav za podizanje vizira. Slični modeli korišteni su u literaturi [35]. Dodatna pojednostavljenja uvedena su u modelima apsorpcijskog sloja i vanjske ljuske kacige. Prosječna masa kaciga dostupnih na tržištu kreće se između 1 i 1,5 kg, dok masa modeliranih komponenata sa kompozitnom ljuskom iznosi 1,13 kg. Korišteni su četverokutni kontinuirani ljuskasti elementi (engl. *Continuum Shell*) tipa SC8R za vanjsku kompozitnu ljusku i trodimenzionalni elementi tipa C3D8R za apsorpcijski sloj i vanjsku ljusku od ABS-a. SC8R konačni elementi odabrani su zbog male debljine ljuske i pretpostavke o ravninskom stanju naprezanja. Čvorovi C3D8R i SC8R elemenata imaju samo translacijske stupnjeve slobode gibanja što rezultira boljom povezanošću mreža dviju komponenti kacige. Kako je simuliran udarac u tjemeni dio kacige izostavljeni su dijelovi apsorpcijskog sloja za zaštitu donjeg dijela lica. Slojevi su djelomično međusobno povezani kinematskom vezom *Tie*. Na Slika 27 prikazan je korišteni pristup modeliranja spoja između numeričkih modela vanjske ljuske i apsorpcijskog sloja kacige. Kinematske veze između ta dva sloja postavljene su svugdje osim na tjemenu dijelu. Zadavanje kinematskih veza samo na dijelu spojeva dviju komponenti rezultira boljom podudarnošću s rezultatima provedene numeričke analize u [35] i eksperimentalnim rezultatima prikazanim u [36]. U potpuno povezanim komponentama kacige dolazilo je do povrata plastično deformiranog dijela apsorpcijskog sloja. Djelomičnom vezom osiguran je vjerodostojnije modeliranje deformiranog stanja apsorpcijskog sloja. Crvenom bojom je na Slika 27 a) prikazana površina kojom je apsorpcijski sloj povezan s ljuskom kacige, dok slika b) prikazuje plastično deformirani apsorpcijski sloj u simulaciji, gdje su sivom bojom označeni dijelovi glave i vanjske kompozitne ljuske. Slika c) prikazuje presjek kacige ispitivane na apsorpciju energije udara prema Snell standardu, gdje se primjećuje odvajanje ljuske i apsorpcijskog sloja uslijed udara [36].



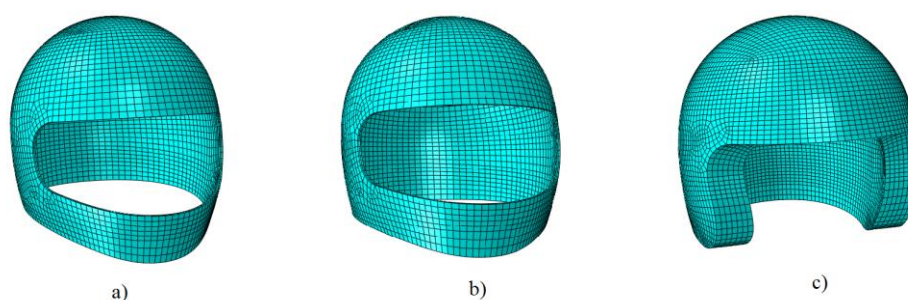
Slika 27. Numerički model kacige: a) površina apsorpcijskog sloja povezana kinematskom vezom, b) deformirani dio apsorpcijskog sloja u provedenoj simulaciji, c) apsorpcijski sloj nakon provedenog ispitivanja [36]

U Tablica 10 je prikazan pregled diskretizacije konačnim elementima pojedinih komponenata i cijelog modela kacige.

Tablica 10. Prikaz podataka konačnih elemenata numeričkog modela kacige

		Tip elementa	Broj elemenata	Broj čvorova
Vanjska kompozitna ljuska		SC8R	7454	11496
Vanjska ljuska od ABS-a		C3D8R	7472	11523
Apsorpcijski sloj		C3D8R	35679	41392
Cijeli model kacige s ljuskom od	kompozita	SC8R + C3D8R	43133	52888
	ABS-a	C3D8R	43151	52915

Na Slika 28 prikazane su mreže konačnih elemenata različitih komponenata kacige, Slika a) prikazuje kompozitnu vanjsku ljusku, slika b) ljusku od ABS-a, dok slika c) prikazuje apsorpcijski sloj.

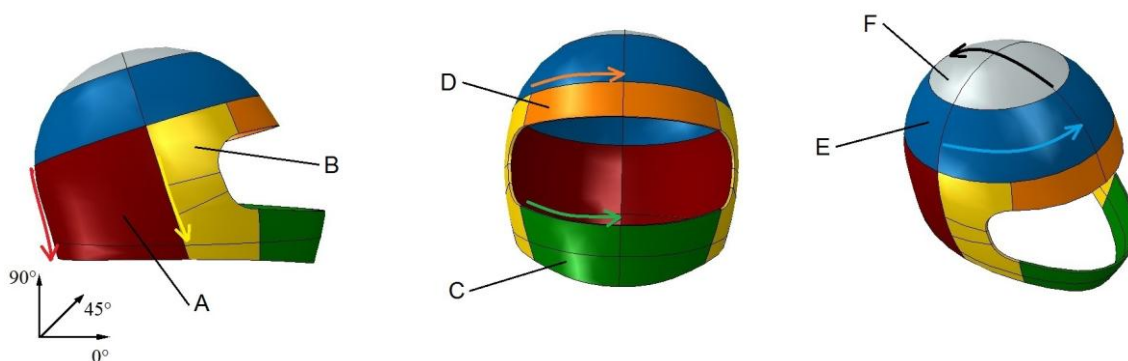


Slika 28. Mreža konačnih elemnata komponenata kacige a) kompozitna ljuska, b) ljuska od ABS-a, c) apsorpcijski sloj

4.3.1. Vanjska ljuska

Radi usporedbe rezultata, modelirana su dva različita materijalna modela vanjske ljuske, kompozitna i ljuska od ABS-a. Oba modela koriste jednaku geometriju i modelirani su prema uzoru zatvorenog tipa kacige. Debljina ljuske je, radi pojednostavljenja, jednolična i iznosi 3 mm. Debljina ljuske komercijalno dostupnih kaciga ovisi o materijalu i kreće se u rasponu od 1,3 do 4 mm [37], [38]. Masa kompozitne ljuske iznosi 0,879 kg, a po debljini ljuske su postavljena dva kontinuirana ljuskasta konačna elementa tipa SC8R. Svaki od elemenata sadrži po 12 slojeva jednolike debljine 0,125 mm. Prilikom generiranja mreže konačnih elemenata potrebno je voditi računa o položaju normale u odnosu na ljuskasti element jer se u tom smjeru određuje debljina kompozitnog sloja kada se koriste SC8R konačni elementi [39]. Svojstva ABS-a korištenog za vanjsku ljusku kacige prikazana su u Tablica 1. Numerički model ljuske od ABS-a diskretiziran je linearnim heksaedarskim konačnim elementima tipa C3D8R

Orijentacija kompozitnih slojeva mjeri se u odnosu na referentnu os koja je definirana određenim djelom kacige. Ljuska kacige podjeljena je na djelove, što proizlazi iz tehnologije izrade. Prikaz referentnih osi s označenim djelovima kacige vidi se na Slika 29. Bojama su označeni različiti rasporedi slojeva kompozita i/ili smjera orijentacije. Zbog kompliciranosti određivanja optimalne orijentacije slojeva, raspored slojeva kacige u ovom radu rađen je po uzoru na model kacige AGV-T2 (Slika 12) [19]. Zbog različite geometrije, više vrsta korištenih materijala i uvedenih pojednostavljenja modela ljuske, orijentacije slojeva nisu u mogućnosti u potpunosti pratiti navedeni model. Raspored slojeva dijelova vanjske ljuske kacige koji su označeni na Slika 29, prikazan je u Tablica 11. Unatoč simetriji geometrije vanjske ljuske kacige odabrani raspored slojeva nije simetričan, te je za numeričku analizu korišten cijeli model.



Slika 29. Referentne osi u odnosu na koje se mjeri orijentacija slojeva vanjske ljuske

Tablica 11. Raspored slojeva vanjske ljuske kacige

Oznaka	Orijentacija slojeva
A	[0/30/-30/0/90/0/90/0/90/30/-30/0]
B	[0/90/60/-60/30/-30/30/-30/60/-60/0/90]
C	[0/90/0/90/30/-30/30/-30/30/-30/90/0]
D	[0/90/30/-30/30/-30/0/90/30/-30/30/-30]
E	[0/90/30/-30/30/-30/30/-30/0/90/30/-30]
F	[0/90/30/-30/30/-30/30/-30/30/-30/0/90]

Prilikom izrade kompozitnih ljusaka često se upotrebljava više vrsta različitih materijala s različitom orijentacijom slojeva, poput primjera kacige proizvođača AVG. Materijalni model kompozitne ljuske kacige je ortotropan u ravninskom stanju naprezanja. Modelirana ljuska je, radi pojednostavljenja, cijela izrađena iz epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima. Svojstva korištenog kompozita, preuzeta su kao generička iz literaturno dostupnih podataka i prikazana su u Tablica 12 [40], [41] gdje su:

- E_1 - modul elastičnosti u smjeru vlakana
- E_2 - modul elastičnosti u smjeru okomitom na smjer vlakana
- G_{ij} - modul smicanja u ravnini i - j
- X^T - vlačna čvrstoća u smjeru vlakana
- X^C - tlačna čvrstoća u smjeru vlakana
- Y^T - vlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana
- Y^C - tlačna čvrstoća u smjeru okomitom na smjer vlakana
- S - smična čvrstoća
- G_{1T} - vlačna energija loma u smjeru vlakana
- G_{1C} - tlačna energija loma u smjeru vlakana
- G_{2T} - vlačna energija loma u smjeru okomitom na smjer vlakana
- G_{2C} - tlačna energija loma u smjeru okomitom na smjer vlakana

Tablica 12. Svojstva kompozita korištenog za vanjsku ljusku kacige [40], [41]

E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12} [-]	G_{12} [MPa]	G_{13} [MPa]	G_{23} [MPa]	ρ [kg/m ³]		
138000	9000	0,32	4800	4800	3200	1543		
X^T [MPa]	X^C [MPa]	Y^T [MPa]	Y^C [MPa]	S [MPa]	G_{1T} [J/m ²]	G_{1C} [J/m ²]	G_{2T} [J/m ²]	G_{2C} [J/m ²]
1520	1520	60	246	95	85000	106300	1000	1000

4.3.1.1. Hashinov kriterij popuštanja [42]

Čvrstoća kompozitne ljuske kacige proračunata je korištenjem Hashinova kriterija za inicijaciju oštećenja i pripadni model za modeliranje oštećenja u kompozitnim slojevima [39]. Hashinov kriterij popuštanja definira četiri načina popuštanja, što je prednost u odnosu na Tsai-Wu i Tsai Hill kriterij. Načini popuštanja su

Vlačno opterećenje vlakana

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2; \quad (2)$$

Tlačno opterećenje vlakana

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2; \quad (3)$$

Vlačno opterećenje matrice

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2; \quad (4)$$

Tlačno opterećenje matrice

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right) - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (5)$$

gdje je $\hat{\sigma}$ efektivni tenzor naprezanja kojim se određuje stanje naprezanja u materijalu nakon pojave oštećenja.

Popuštanje vlakana nastupa ukoliko F_f^t , F_f^c postane veće od jedan, a do popuštanja matrice dolazi u slučaju ako F_m^t , F_m^c postane veće od jedan.

Ovisno o načinu opterećenja iznos parametara oštećenja je

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{za } \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c & \text{za } \hat{\sigma}_{11} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{za } \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c & \text{za } \hat{\sigma}_{22} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c) \quad (8)$$

Konstitutivna relacija koja određuje naprezanje u ortotropnom materijalu u slučaju ravninskog stanja naprezanja je

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_d \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (9)$$

gdje, \mathbf{C}_d označava matricu elastičnosti elementa sa uključenim stanjem oštećenja definiranu kao

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} (1 - d_f)E_1 & (1 - d_f)(1 - d_m)\nu_{21}E_1 & 0 \\ (1 - d_f)(1 - d_m)\nu_{12}E_1 & (1 - d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - d_s)GD \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Parametar D u jednadžbi (10) definiran je kao

$$D = 1 - (1 - d_f)(1 - d_m)\nu_{12}\nu_{21}. \quad (11)$$

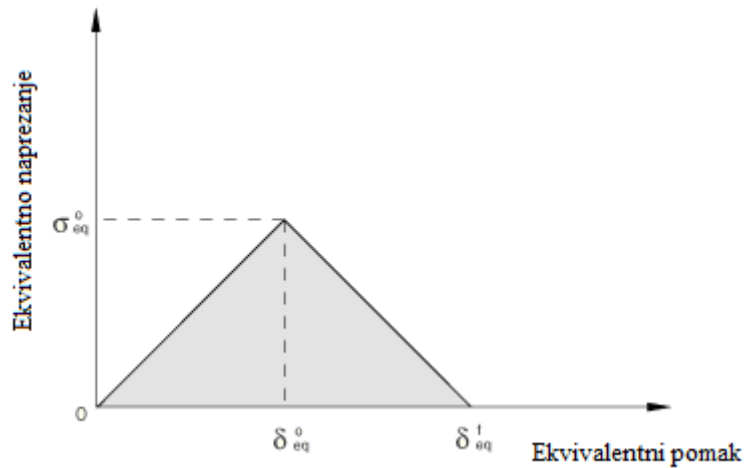
Efektivni tenzor naprezanja određen je preko operatora oštećenja \mathbf{M}

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma}, \quad (12)$$

gdje je \mathbf{M} definiran kao

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1 - d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1 - d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1 - d_s)} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Dijagram na Slika 30 prikazuje numeričku aprosimaciju tipičnog Hookeovog dijagrama za kompozite ojačane vlaknima. Površina koju zatvara trokut dijagrama predstavlja potrošene energije. Pravac sa rastućim vrijednostima odnosi se na linearno elastično ponašanje, dok se pravac s padajućim vrijednostima naprezanja javlja prilikom pojave oštećenja.



Slika 30. Dijagram naprezanje ekvivalentni pomak za kompozit ojačan vlaknima [39]

Ekvivalentni pomak u ovom modelu oštećivanja definiran je ovisno o načinima popuštanja kao:

Vlačno opterećenje vlakna ($\sigma_{11} \geq 0$)

$$\delta_{eq}^{ft} = L^C \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2}, \quad (14)$$

$$\sigma_{eq}^{ft} = \frac{\langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle + \alpha \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{ft} / L^C}, \quad (15)$$

Vlačno opterećenje vlakna ($\sigma_{11} < 0$)

$$\delta_{eq}^{fc} = L^C \langle -\varepsilon_{11} \rangle, \quad (16)$$

$$\sigma_{eq}^{fc} = \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle = \langle -\sigma_{11} \rangle}{\delta_{eq}^{fc} / L^C}, \quad (17)$$

Vlačno opterećenje vlakna ($\sigma_{22} \geq 0$)

$$\delta_{eq}^{mt} = L^C \sqrt{\langle \varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \quad (18)$$

$$\sigma_{eq}^{mt} = \frac{\langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{mt} / L^C}, \quad (19)$$

Vlačno opterećenje vlakna ($\sigma_{22} < 0$)

$$\delta_{eq}^{mc} = L^C \sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2}, \quad (20)$$

$$\sigma_{eq}^{ft} = \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{mc} / L^C}, \quad (21)$$

gdje je L^C karakteristična duljina temeljena na geometriji elementa, a za ljuskaste elemente računa se kao kvadrat površine elementa. Simbol $\langle \rangle$ predstavlja Macaulayev operator čiji izraz glasi

$$\langle \alpha \rangle = (\alpha + |\alpha|) / 2. \quad (22)$$

Nakon inicijacije oštećenja prikazanog negativnim koeficijentom pravca na Slika 30, parametri oštećenja dobivaju vrijednost prema izrazu

$$d = \frac{\delta_{eq}^f (\delta_{eq} - \delta_{eq}^0)}{\delta_{eq} (\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)}, \quad (23)$$

pri čemu je δ_{eq}^0 pomak pri kojem nastaje oštećenje, a δ_{eq}^f pomak popuštanja sloja po bilo kojem kriteriju popuštanja.

U slučaju popuštanja svih materijalnih točaka u slojevima kompozita po vlačnom ili tlačnom načinu popuštanja vlakana, smatra se da je došlo do popuštanja konačnog elementa [39].

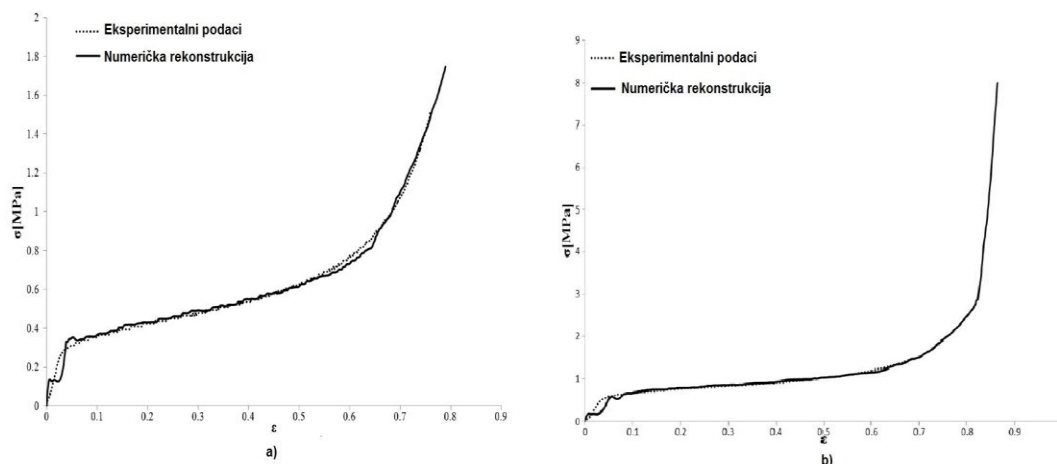
4.3.2. Apsorpcijski sloj

Apsorpcijski sloj modeliran je na način da prati unutarnju konturu vanjske ljuske kacige. Jednolike je debljine koja iznosi 35 mm. Uvedena pojednostavljenja prilikom modeliranja apsorpcijskog sloja, uz izostanak zaštite donjeg dijela lica, odnose se na korištenje jedne vrste EPS-a za cijeli sloj. Potreba za apsorpcijom energije nastale udarom određuje odabir materijala. Ekspanirani polistiren EPS, odabran je kao materijal za izradu apsorpcijskog sloja modela kao najčešći izbor proizvođača kaciga. U Abaqusu je dostupan materijalni model *Crushable Foam* koji vjerno opisuje ponašanje EPS-a pri udarnom opterećenju. Vrijednosti svojstava EPS-a preuzeta su iz literature [16].

4.3.2.1. Crushable Foam

Ponašanje deformabilnih pjena okarakterizirano je s tri područja [39]. Na Slika 31 je prikazan dijagram naprezanje deformacija EPS-a s različitim gustoćama. Dijagram označen slovom a)

prikazuje krivulju naprezanje deformacija za EPS gustoće 65 kg/m^3 , dok dijagram označen slovom b) prikazuje krivulju naprezanje deformacija za EPS gustoće 90 kg/m^3 .

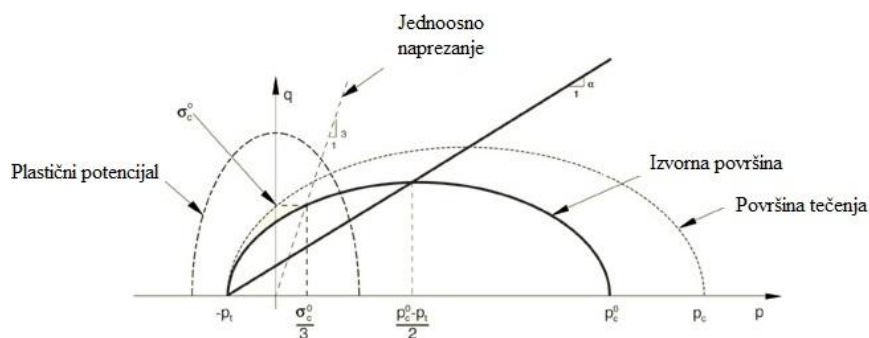


Slika 31. Dijagram naprezanje deformacija EPS-a različite gustoće: a) 65 kg/m^3 b) 90 kg/m^3 [16]

Prvo područje karakterizira linearno izotropan elastičan model opisan Hooke-ovim zakonom.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (24)$$

Drugo područje karakterizira plastična deformacija s jednolikim porastom deformacije uz približno konstantno naprezanje. Za definiranje ovog područja potrebno je odrediti površinu tečenja. Abaqus nudi dva dostupna modela: model volumnog očvršćenja, u kojem točka na površini tečenja u meridionalnoj ravnini predstavlja hidrostatsko vlačno naprezanje. Drugi model je izotropan model, izvorno razvijen za metalne pjene. *Crushable Foam* sa modelom volumnog očvršćenja koristi površinu tečenja s eliptičnom ovisnošću devijatorskog naprezanja o tlaku. Pretpostavlja se da je razvoj površine tečenja kontroliran volumenom plastičnim defomacijama materijala. *Crushable Foam* sa modelom volumnog očvršćenja prikazana je na Slika 32.



Slika 32. *Crushable Foam* s volumnim očvršćenjem [39]

Površina tečenja za model volumenog očvršćenja definirana je kao

$$F = \sqrt{q^2 + \alpha^2 (p - p_0)} - B = 0, \quad (25)$$

gdje je p tlak ili srednje normalno naprezanje

$$p = -\frac{1}{3} \text{tr } \boldsymbol{\sigma}, \quad (26)$$

a q je ekvivalentno naprezanje po Von Misesu,

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}}. \quad (27)$$

\mathbf{S} u jednadžbi 28 je devijatorsko naprezanje

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} + p\mathbf{I}. \quad (28)$$

B u jednadžbi 29 je iznos vertikalne q osi površine elipse,

$$B = \alpha A = \alpha \frac{p_c + p_t}{2}. \quad (29)$$

gdje je A iznos horizontalne p osi površine elipse. α je oblikovni faktor koji određuje relativnu veličinu osi, a p_0 je središte površine elipse na p osi

$$p_0 = \frac{p_c - p_t}{2}. \quad (30)$$

U jednadžbi 30, p_t je čvrstoća materijala u hidrostatskom vlačnom naprezanju (engl. *Yield Stress in Hydrostatic Tension*) dok p_c označava granicu tečenja pri hidrostatskoj kompresiji (engl. *Yield Stress in Hydrostatic Compression*) i uvijek mora biti pozitivan.

Oblikovni faktor α moguće je izračunati koristeći inicijalnu granicu tečenja jednoosne kompresije σ_c^0 , inicijalne granice tečenja hidrostatske kompresije p_c^0 i čvrstoće pri hidrostatskoj kompresiji p_t prema izrazu

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{(3k_t + k)(3 - k)}} \quad (31)$$

gdje je k omjer kompresijskih granica tečenja (engl. *Compression Yield Stress Ratio*), a k_t omjer hidrostatskih granica tečenja (engl. *Hydrostatic Yield Stress Ratio*)

$$k = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0}, \quad (32)$$

$$k_t = \frac{p_t}{p_c^0}.$$

Vrijednost faktora k i k_t mora se kretati u zadanim granicama $0 < k < 3$ i $0 < k_t$ prema [39].

Treće područje je područje očvrnuća materijala do kojeg dolazi zbog naglog porasta naprezanja što uzrokuje gnječenje ćelija EPS-a koja više ne mogu apsorbirati energiju. Očitava se iz dijagrama naprezanje deformacija pri jednoosnom tlačnom opterećenju. Za prvu očitavanu točku uzima se vrijednost bez pojave plastične deformacije. Primjer takvog dijagrama prikazan je na Slika 31. U Tablica 13 su prikazane očitane vrijednosti iz eksperimentalnih podataka očvrnuća EPS-a gustoća 65 kg/m^3 i 90 kg/m^3 . Masa modeliranog apsorpcijskog sloja sa EPS-om gustoće 65 kg/m^3 iznosi $0,284 \text{ kg}$.

Tablica 13. Tablica očvrnuća EPS-a različitih gustoća [16]

EPS 65		EPS 90	
Naprezanje [MPa]	Jednoosna plastična deformacija [-]	Naprezanje [MPa]	Jednoosna plastična deformacija [-]
0,3	0	0,5	0
0,4	0,12	1	0,42
0,7	0,53	1,5	0,66
0,8	0,59	2,5	0,76
1	0,65	3	0,79
1,75	0,75	8	0,82

Preostala svojstva za modeliranje apsorpcijskog sloja pomoću modela Crushable Foam prikazana su u Tablica 14, gdje je k omjer kompresijskih granica tečenja i kt Omjer hidrostatskih granica tečenja

Tablica 14. Svojstva EPS-a gustoće 65 kg/m^3 [16]

$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$E \text{ [MPa]}$	$\nu [-]$	$k [-]$	$k_t [-]$
65	7,51	0	1,5	300

5. REZULTATI

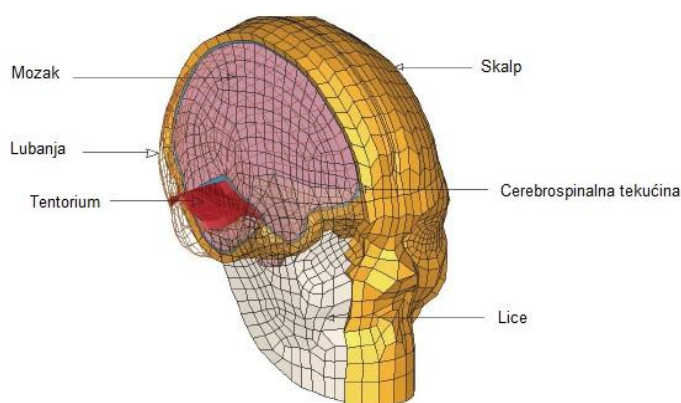
5.1. Validacija numeričkog modela

Duže vrijeme u fokus biomehaničkih istraživanja stavljeno je razumijevanje mehanizma ozljede glave. Ozljeda je posljedica prekoračenja graničnih svojstava nekog tkiva opterećenjem. 1975. godine predložen je prvi numerički model ljudske glave za analizu metodom konačnih elemenata, što je značilo mogućnost razvijanja novog kriterija za procjenu rizika ozljede.

5.1.1. SUFEHM model glave

Model glave s kojim su uspoređivani dobiveni rezultati ovog diplomskog rada je SUFEHM (engl. *Strasbourg University Finite Element Head Model* [32]). Navedeni model koristio je geometrijske značajke glave odraslog muškarca. Modelirani dijelovi glave su lubanja, *falx cerebri* i *tentorium cerebelli*, subarahnoidni prostor koji sadrži cerebrospinalnu tekućinu, skalp, mozak, mali mozak, moždano deblo.

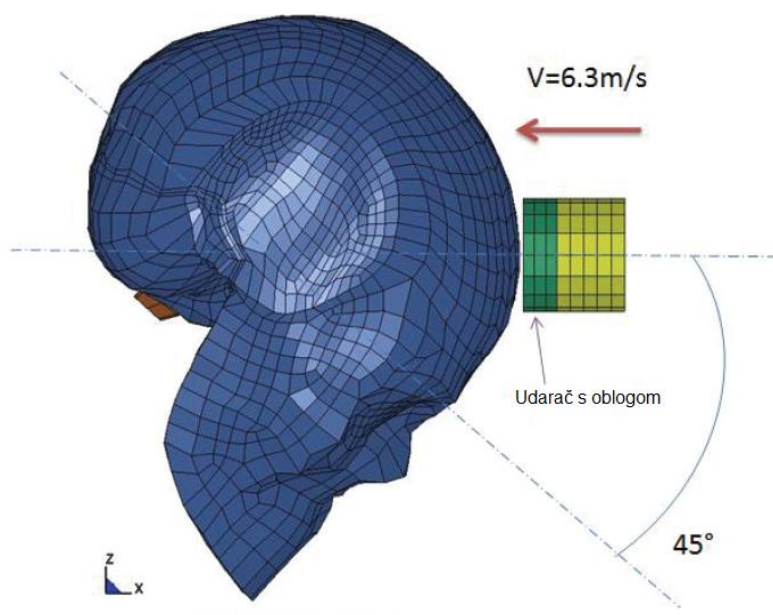
Treba napomenuti da u SUFEHM modelu nije modeliran vrat. Model ukupno sadrži 13208 elemenata, mase 4,7 kg (Slika 33) [32].



Slika 33. SUFEHM model glave [32]

Većina dijelova SUFEHM modela imaju elastična materijalna svojstva. Izuzetak čini mozak kojemu su dodijeljena viskoelastična svojstva. Lubanja je modelirana kao troslojna s time da su vanjski i unutarnji sloj lubanje kortikalne, čvrste kosti, dok je srednji sloj spužvasta kost.

1977. godine izveden je eksperiment čiji se podaci u ovom radu koriste za usporedbu rezultata dobivenih numeričkom analizom. Rezultati dobiveni SUFEHM modelom također su uspoređeni s eksperimentalnim podacima. U eksperimentu se cilindrični udarač mase 5,6 kg giba brzinom od 6,3 m/s i udara u glavu pod kutem od 45° u odnosu na ravninu koja prolazi kroz centar mase (Slika 34).



Slika 34. SUFEHM model s konfiguracijom eksperimentalnog ispitivanja [32]

5.1.2. Simulacija udarca u glavu i validacija numeričkog modela

Za simulaciju udarca u glavu potrebno je modelirati udarač, čija je masa poznata i iznosi 5,6 kg. Udarač je modeliran kao cilindrično tijelo sastavljeno iz dva dijela, obloge i tijela udarača. Obje komponente definirane su kao linearno elastična, homogena tijela, te su im zadana materijalna svojstva. Promjer obje komponente iznosi 35 mm. Obloga udarača visine je 25 mm, dok je visina tijela udarača visine 182 mm. Dimenzije visine određene su iz volumena i definirane gustoće materijala s uvjetom pridržavanja zadane mase. Spoj obloge i tijela udarača postavljen je kao kinematska veza *Tie*. Tijelo udarača sastoji se od 1748 linearnih heksaedarskih konačnih elemenata C3D8R, dok se obloga udarača sastoji od 1040 linearnih heksaedarskih konačnih elemenata C3D8R. Svojstva udarača prikazana su u Tablica 15, a broj pojedinih konačnih elemenata i čvorova prikazan je u Tablica 16.

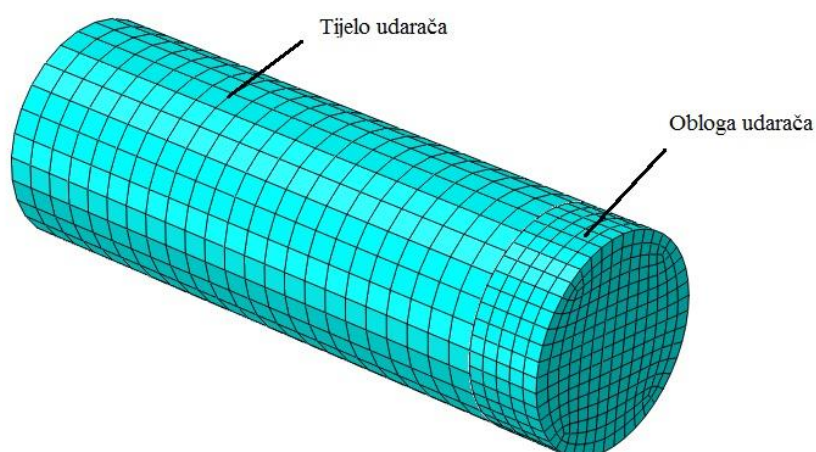
Tablica 15. Svojstva udarača [32]

	d [mm]	h [mm]	ρ [kg/m ³]	m [kg]	E [MPa]	ν [-]
Obloga udarača	35	25	1000	0,096	13,6	0,16
Tijelo udarača	35	182	7850	5,5	210000	0,3

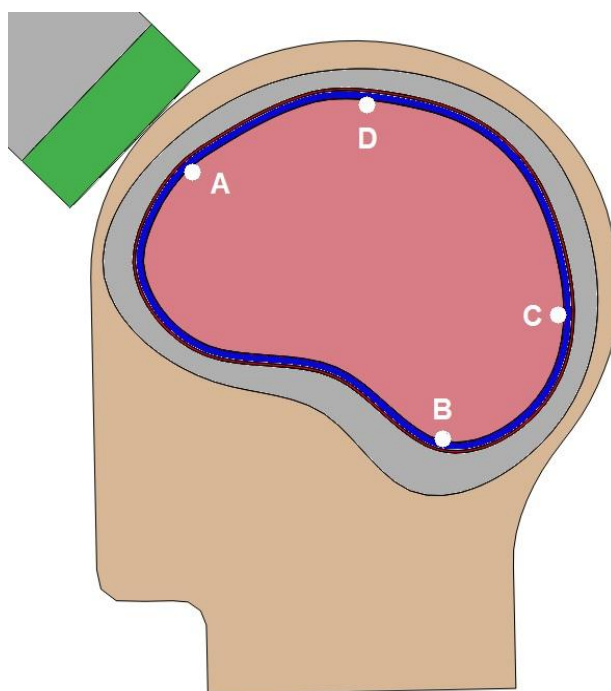
Tablica 16. Podaci o numeričkom modelu udarača

	Tip elemenata	Broj elemenata	Broj čvorova
Obloga udarača	C3D8R	1040	1386
Tijelo udarača	C3D8R	1748	2184
Sklop udarača	C3D8R	2788	3570

Na Slika 35 je prikazana mreža konačnih elemenata numeričkog modela udarača s označenim dijelovima.

**Slika 35. Udarac diskretiziran konačnim elementima sa prikazanim dijelovima**

Na Sliku 36 je prikaz početne pozicije udarača u odnosu na glavu. Model glave i udarač postavljene su u početni položaj na način da je cilindrični udarač postavljen pod kutem od 45° u odnosu na ravninu koja prolazi kroz centar mase modela glave. U inicijalnom koraku, dodijeljena je početna brzina udarača koja iznosi 6,3 m/s. Vektor brzine djeluje u smjeru cilindrične osi udarača koja prolazi kroz centar mase glave. Na glavu nisu postavljeni dodatni rubni uvjeti. Svojstva dodira kontaktnih površina između svih dijelova u interakciji definirane su kao općeniti kontakt (engl. *General Contact*), tvrdi kontakt (engl. *Hard Contact*) u Abaqus/Explicitu. Faktor trenja između svih dijelova, proizvoljno je postavljen na vrijednost 0,2. Ukupno vrijeme trajanja simulacije iznosi 14 ms.

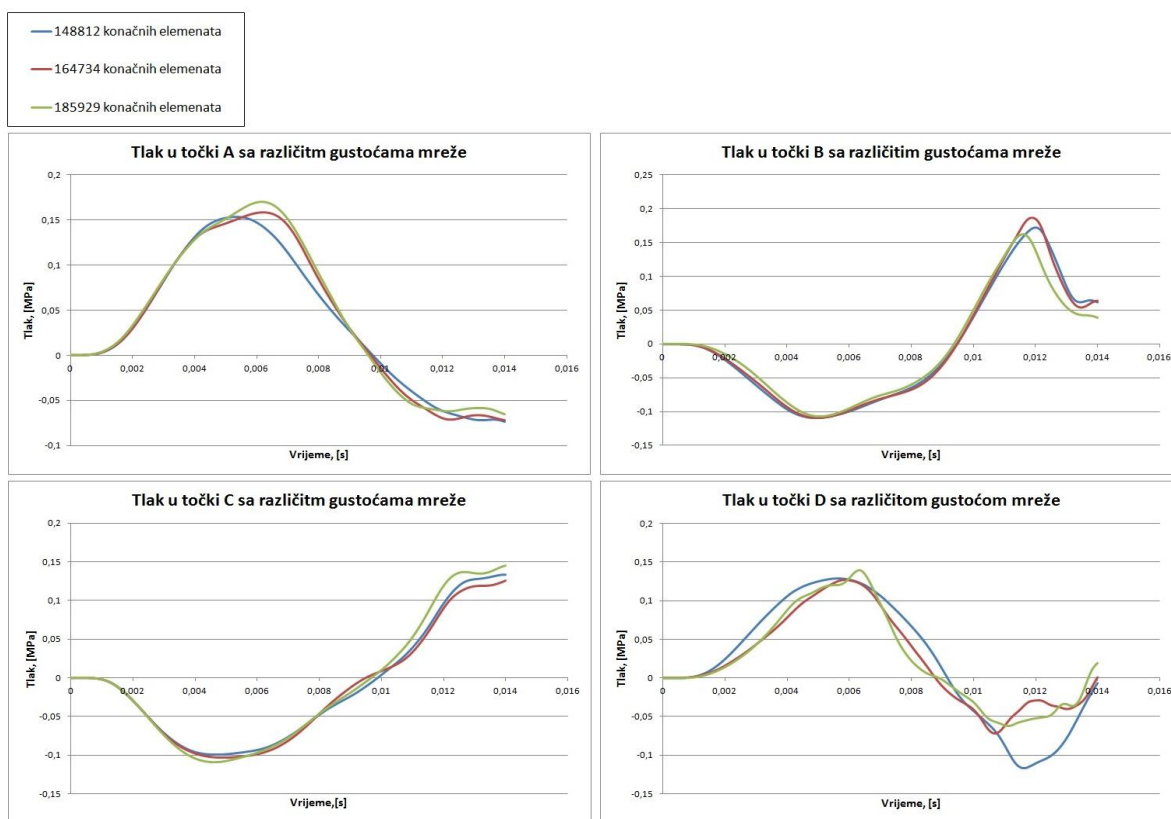


Slika 36. Pozicija udarača u odnosu na glavu i točke mjerenih vrijednosti tlaka

Na Sliku 36 prikazane su i oznake točaka na mozgu u kojima su numerički izračunate vrijednosti tlaka uspoređene s referentnim vrijednostima iz literature. Odabrane točke odgovaraju mjestima na kojima su u [32] dane vrijednosti tlaka pri udaru. Točka A nalazi se na prednjem, čeonom dijelu mozga, najbliže mjestu udarača. Točka B nalazi se na stražnjoj strani mozga, blizu mjesta na kojemu bi se nalazio otvor za leđnu moždinu. Točka C nalazi se na zatiljnom dijelu mozga, dok se točka D nalazi na tjemenom dijelu.

5.1.3. Usporedba dobivenih rezultata

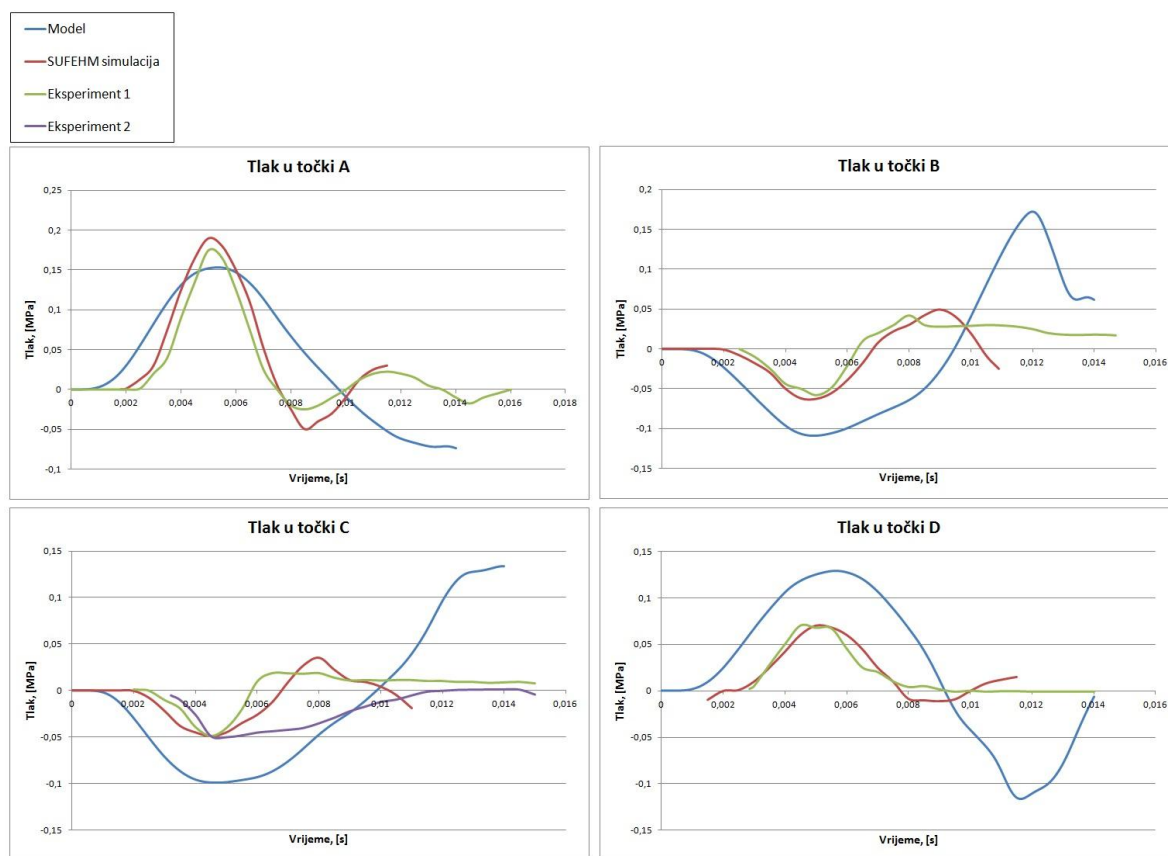
Provedena numerička analiza je nelinearna dinamička i provedena u Abaqus/Explicitu. Ukupno analizirano vrijeme iznosi 14 ms. Kako je tlak mjeran na površini mozga, provedene su simulacije s različitim gustoćama mreža. Korištena su tri numerička modela glave s različitim gustoćama mreže konačnih elemenata mozga, te je uspoređena konvergencija numeričkog rješenja u naznačenim točkama. Rezultati validacije numeričkog modela glave prikazani su na Slika 37. Promjenom gustoće mreže dolazi do promjene položaja čvorova i elemenata, što za posljedicu ima prikazana odstupanja rezultata jer nije moguće odabrati potpuno istu točku za različite gustoće mreže. Mjerne točke odabrane su na približno istim mjestima, sa što je moguće manjim odmakom od početno odabranih točaka. Gustoće mreža ostalih dijelova numeričkog modela glave nisu mijenjane.



Slika 37. Dijagrami usporedbe utjecaja gustoće mreže na tlakove u odabranim točkama

Analizom konvergencije rješenja utvrđeno je da su svi korišteni modeli dali približno jednake rezultate. Radi smanjivanja vremena trajanja simulacije, za daljnju numeričku analizu korišten je numerički model glave koji sadrži 148812 konačnih elemenata. Isti numerički model glave korišten je za usporedbu rezultata sa SUFEHM modelom i eksperimentalnim podacima. Na

Slika 38 prikazana je usporedba numeričkih rezultata s eksperimentalnim i numeričkim rezultatima dobivenih SUFEHM modelom prema [32].



Slika 38. Dijagrami usporedbe vrijednosti tlakova u odabranim točkama s eksperimentalnim i numeričkim rezultatima iz [32]

Dijagrami na Slika 38 prikazuju vrijednosti dobivenih rezultata koji se djelomično podudaraju sa SUFEHM modelom i eksperimentalnim podacima. Dobiveni rezultati prate trend krivulja eksperimentalnih podataka i ovjerenog SUFEHM modela. Do razlike dolazi zbog uvedenih pojednostavljenja prilikom modeliranja glave. Nisu modelirani mali mozak, moždani ventrikuli i moždano deblo. Modelirana glava također ne sadrži podvostručenje moždane ovojnice *dure mater*, odnosno tvrde mozgovnice koja pruža određenu krutost. Uzevši u obzir homogenost standardne ispitne glave koja se koristi pri ispitivanjima apsorpcije energije udara u kacigu, u okviru ovog rada, podvostručenja tvrde mozgovnice, *falx cerebri* i *tentorium cerebelli* nisu modelirana zbog ostvarivanja što jednostavnije geometrije unutrašnjosti glave. Na taj način izbjegnute su dodatne unutarnje podjele pojedinih dijelova. Nedostatak podvostručenja tvrde mozgovnice, *falx cerebri* utječe na vrijednosti dobivenih rezultata. *Falx cerebri* dijeli mozak na lijevu i desnu polutku, a *tentorium cerebelli* dijeli mali i veliki mozak. Osim podjele mozga, *falx cerebri* i *tentorium cerebelli* imaju ulogu

povezivanja što ograničava slobodno gibanje unutrašnjih elemenata mozga. Elementi unutar mozga svojim gibanjem uzrokuju promjene tlakova. Najveće odstupanje rezultata pokazuje se u točkama B i C koje se nalaze na donjem i zatiljnom dijelu lubanje gdje je smješten mali mozak, moždano deblo i *tentorium cerebelli*. Na razliku u rezultatima također utječe i različita geometrija i masa modelirane glave i SUFEHM modela. Razlika u masi numeričkog modela glave korištenog u ovom radu i SUFEHM modela iznosi 0,57 kg. Kako je već napomenuto SUFEHM model nema modeliran vrat koji je u modelu ovog rada izrađen radi što veće sličnosti sa modelom glave koji propisuje standard ISO/EN960. Nakon kontakta, model glave i udarač se počinju sve više udaljavati jedno od drugoga jer nisu postavljena ograničenja pomaka u obliku početnih rubnih uvjeta.

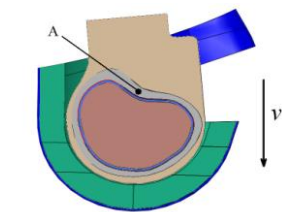
Kontakt između udarača i glave traje 5 ms. U dijagramima na Slika 38 je očitije značajnije odstupanje podataka od SUFEHM modela i provedenog eksperimenta nakon 10 ms. Razlog tome je spomenuto slobodno gibanje glave nakon udarca. Prema dostupnim podacima, učitani su podaci dva eksperimenta pri određivanju tlaka u točki C [32]. Razliku je moguće očitati i između dva provedena eksperimenta, što potvrđuje kompleksnost analize biomehaničkih modela ljudske glave.

Prema Slika 38 može se zaključiti da je numerički model dobar jer se trendovi krivulja tlakova podudaraju s eksperimentalnim i numeričkim vrijednostima iz literature [32]. Razlike u rezultatima javljaju se zbog prethodno navedenih razloga. Zbog navedenih odstupanja rezultata i vrijednosti koju propisuje standard ECE R22.05, kriterij ozljede glave u daljnjoj numeričkoj analizi određen je prema iznosu akceleracije. Točka mjerenja akceleracije uzeta je na lubanji kao najkrućem dijelu modelirane glave.

5.2. Numerička analiza ispitivanja udara u kacigu

Numerička simulacija ispitivanja kacige pri udarnom opterećenju provedena je po uzoru na standard ECE R22.05 iz kojeg su preuzeti početni uvjeti. Provedena numerička analiza je nelinearna i dinamička. Provedene su dvije analize sa različitim materijalnim modelom vanjske ljuske kacige. Vrijeme trajanja obje analize iznosi 8 ms. Simuliran je udarac u tjemeni dio kacige, odnosno točku P označenu na Slika 16. Početna brzina kojom kaciga s modelom glave udara u krutu podlogu iznosi 7,5 m/s. Kruta podloga modelirana je u Abaqusu kao pravokutna trodimenzionalna kruta ljuska (engl. *3D Analytical Rigid Shell*), te joj nije potrebno dodijeliti materijalna svojstva. Krutoj podlozi u središtu je dodijeljena referentna točka u koju su postavljeni rubni uvjeti koji ne dozvoljavaju pomake. Na Slika 39 je prikazan

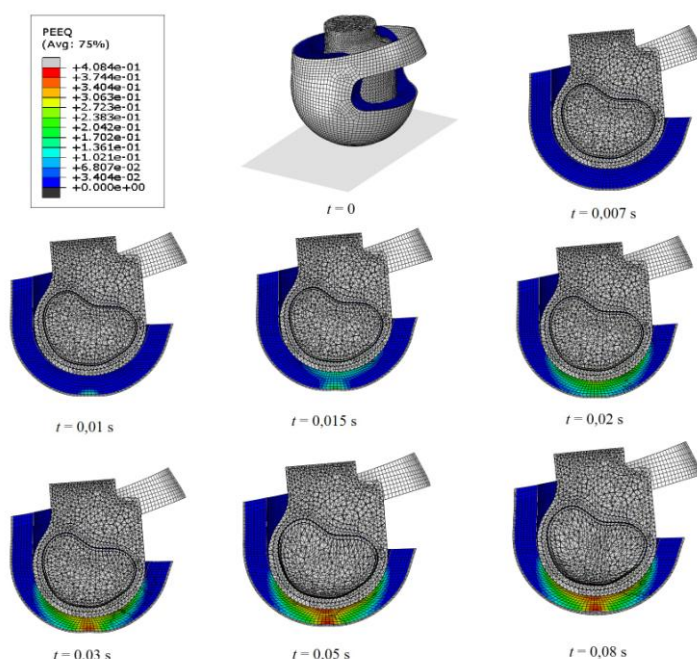
početni položaj numeričkog modela kacige s glavom iznad krute ploče. Svojstva dodira kontaktnih površina između svih dijelova u interakciji definirane su kao općeniti kontakt (engl. *General Contact*), tvrdi kontakt, (engl. *Hard Contact*) u Abaqus/Explicitu. Faktor trenja između svih dijelova je postavljen na vrijednost 0,4 prema [16]. Ukupno analizirano vrijeme u ovim numeričkim simulacijama iznosi 8 ms. Kriterij procjene ozlijede glave izvršen je prema iznosu akceleracije na lubanji kao najkrućem dijelu numeričkog modela glave. Mjerna točka akceleracije odabrana je što bliže centru mase i označena je slovom A na Slika 39.



Slika 39. Točka mjerenja akceleracije na početnom položaju numeričkog modela kacige s glavom

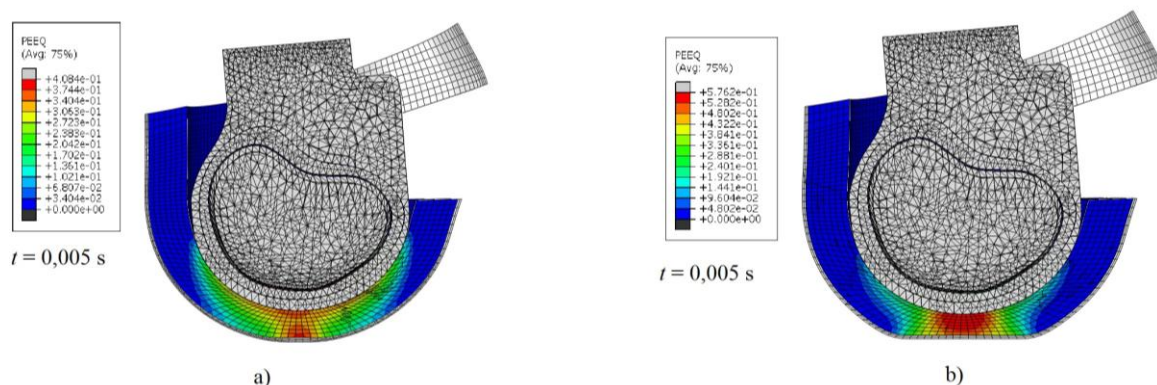
Prije početka simulacije određena je maksimalna dozvoljena degradacija konačnog elementa vanjske ljuske kacige i iznosi 0,8, što znači da će u slučaju oštećenja vrijednost jednog od parametara biti 0,8 umjesto 1. Razlog tome je izbjegavanje mogućih numeričkih problema.

Slika 40 prikazuje ekvivalentnu plastičnu deformaciju apsorpcijskog sloja u vremenskom intervalu od 8 ms. U ovom prikazu korištena je kompozitna vanjska ljuska.



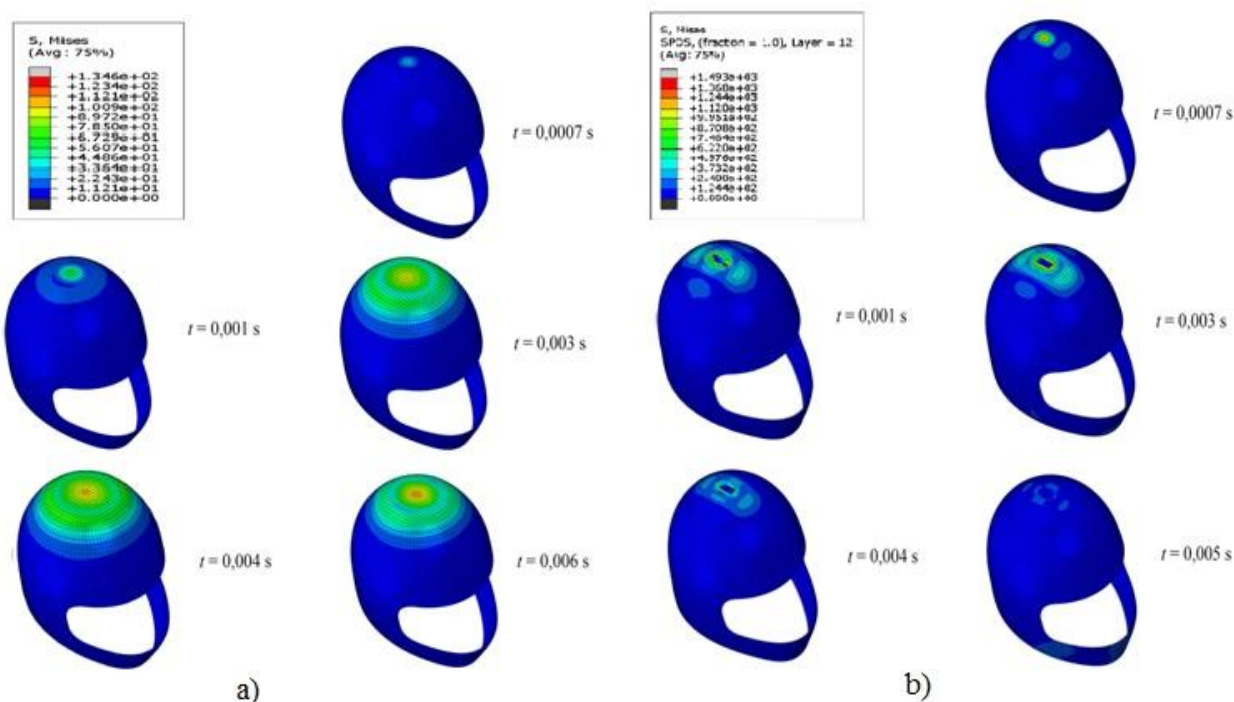
Slika 40. Prikaz ekvivalentne plastične deformacije [-] apsorpcijskog sloja kacige s kompozitnom ljuskom kroz vrijeme

Promjenom materijala ljuske, korištenjem ABS-a umjesto kompozita, zbog manje krutosti dolazi do veće deformacije. Na Slika 41 je usporedno prikazana ekvivalentna plastična deformacija apsorpcijskog sloja a) kompozitne vanjske ljuske i b) ljuske od ABS-a. Na istoj slici je prikazana razlika u deformiranom obliku ljusaka. Deformacija apsorpcijskog sloja prikazana je u trenutku t koji iznosi 5 ms.



Slika 41. Usporedba ekvivalentne plastične deformacije [-] apsorpcijskog sloja: a) kompozitne ljuske, b) ljuske od ABS-a

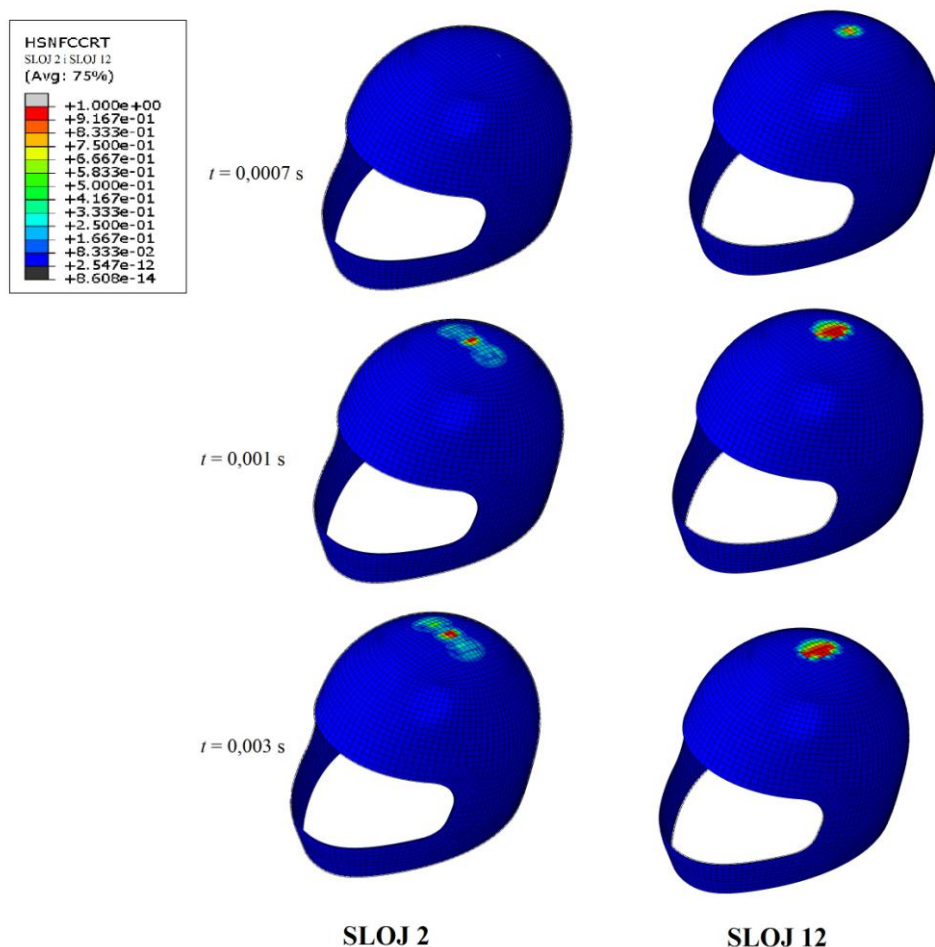
Slika 42 prikazuje ekvivalentno naprežanje prema Von Misesu u ljuskama a) ljuska od ABS-a, b) kompozitna ljuska. Naprežanja su prikazana u različitim vremenskim intervalima.



Slika 42. Ekvivalentno naprežanje po Von Misesu [MPa] za a) ljusku kacige od ABS-a, b) vanjski sloj kompozitne ljuske

Iz Slika 42 a) vidljivo je da je maksimalno naprezanje prema Von Misesu za ljusku od ABS-a 134,6 MPa. Prema literaturno dostupnim podacima, maksimalna vlačna čvrstoća za ABS kreće se u rasponu od 24 MPa do 138 MPa, dok je raspon za vrijednost granice tečenja između 28 MPa i 93,1 MPa [44]. Možemo zaključiti da će doći do pojave plastične deformacije i vrlo vjerojatno loma vanjske ljuske. Vanjskoj ljusci od ABS-a dodijeljen je izotropan linearno elastičan materijalni model prema [16].

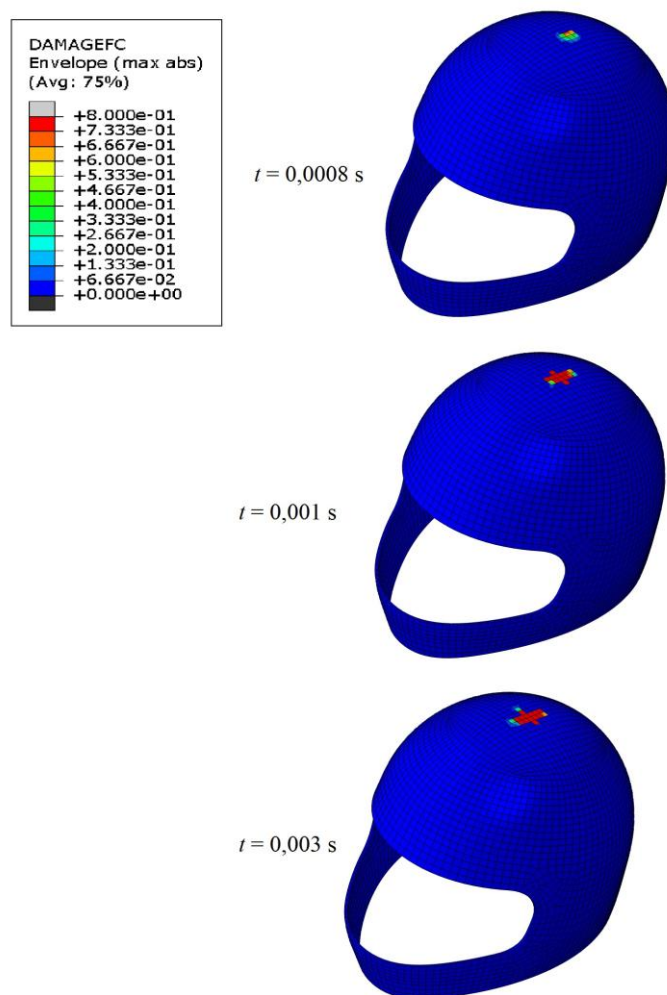
Napomenuto je da je kompozitna ljuska sastavljena od 12 različito orijentiranih slojeva kompozita po konačnom elementu. Dva konačna elementa po presijeku debljine ljuske daju ukupno 24 sloja. Slojevi su slagani na način da je prvi sloj uz apsorpcijski sloj kacige, dok se ostali postavljaju u smjeru normale konačnog elementa. Slika 42 b) prikazuje ekvivalentno naprezanje po Von Misesu za dvanaesti sloj drugog elementa kompozitne ljuske. Spomenuti sloj je u kontaktu s krutom podlogom.



Slika 43. Vrijednost Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja vlakana [-] u drugom i dvanaestom sloju kompozitne ljuske

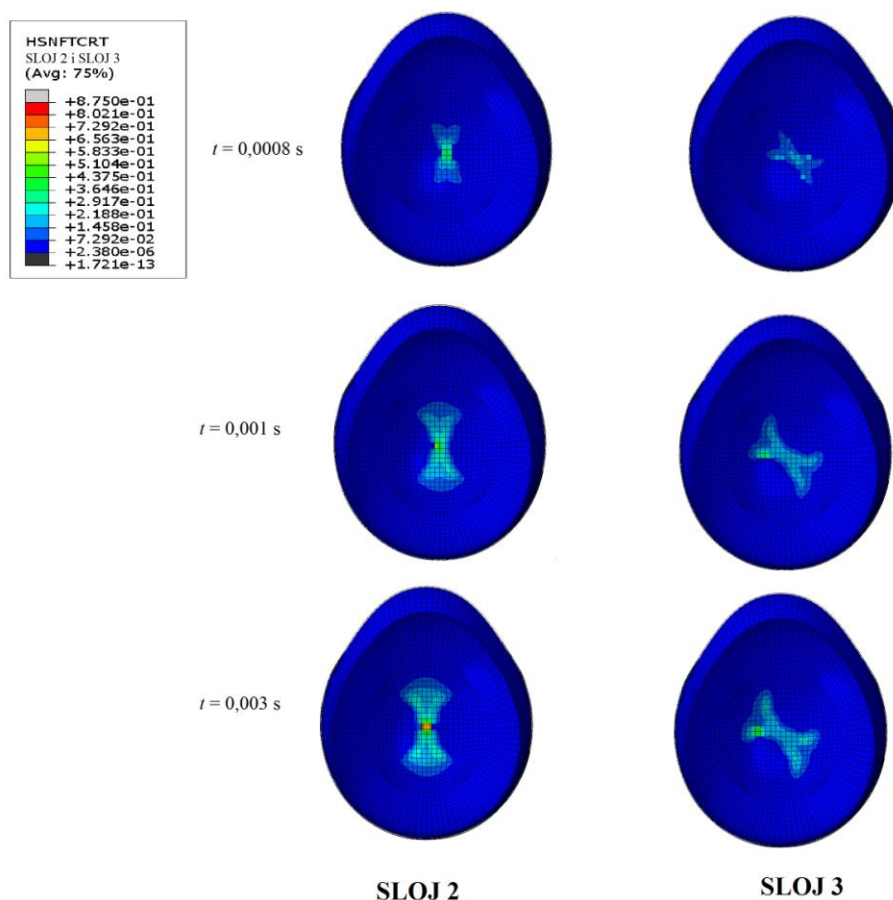
Slika 43 prikazuje Vrijednost Hashinovog kriterija tlačnog popuštanja vlakana u drugom i dvanaestom sloju kompozitne ljuske. Odabran je vremenski interval sa zadnjom vremenskom točkom u iznosu od 3 ms, nakon koje ne dolazi do povećanja oštećenja. Do popuštanja dolazi u svim slojevima kompozita. Oba sloja prikazana na Slika 43 imaju orijentaciju od 90° i vrijednost Hashinova kriterija tlačnog popuštanja za njih iznosi jedan, odnosno dolazi do popuštanja.

Na Slika 44 prikazan je parametar tlačnog oštećenja vlakna sa maksimalnom vrijednošću od 0,8, što je jednako postavljenoj vrijednosti za maksimalnu degradaciju konačnog elementa, što za posljedicu ima popuštanje materijalnih točaka.



Slika 44. Parametar tlačnog oštećenja vlakana

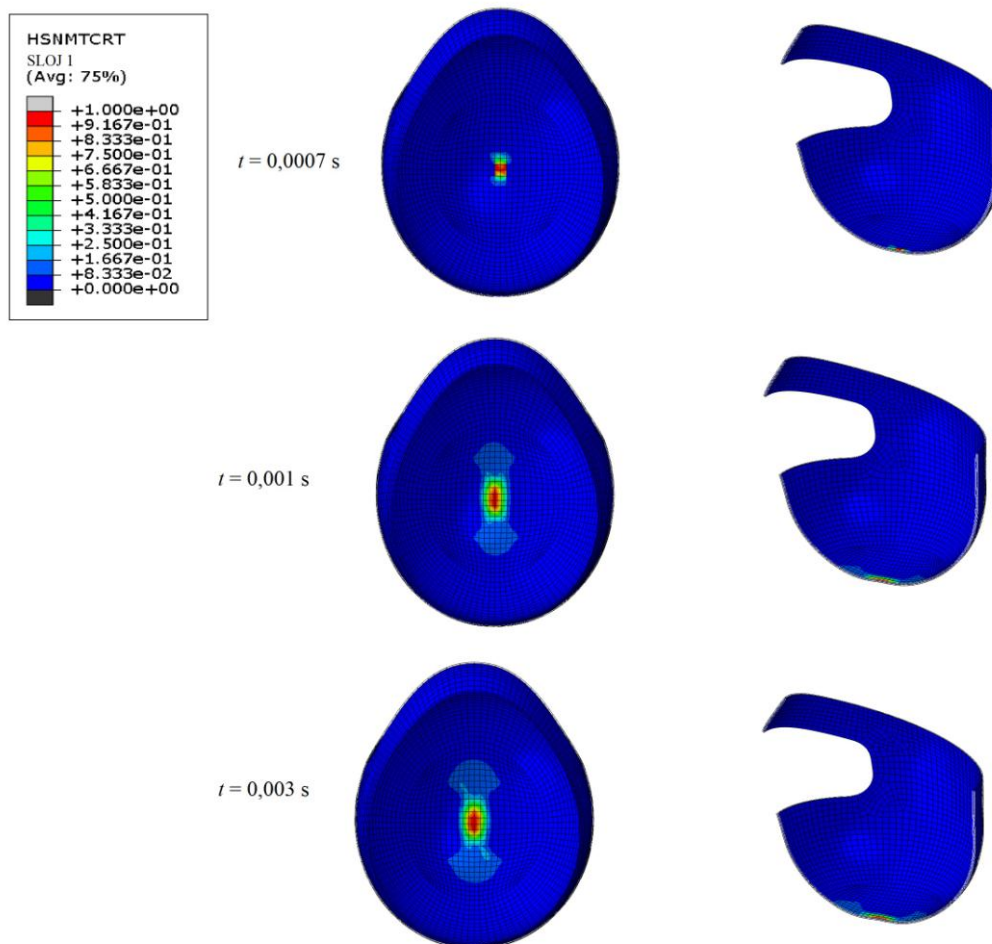
Pregledom vrijednosti Hashinova kriterija za vlačno popuštanje vlakana, primjećujemo da ne dolazi do popuštanja po ovom načinu popuštanja. Drugi sloj ima maksimalna vrijednost koja iznosi 0,875 što je manje od potrebne vrijednosti za nastupanje popuštanja po ovom kriteriju. Na Slika 45 su prikazani slojevi 2 i 3. Sloj 2 ima, već spomenutu orijentaciju slojeva od 90° , dok sloj 3 ima orijentaciju slojeva od 30° . Maksimalna vrijednost koju postiže sloj 3 za ovaj način popuštanja iznosi 0,6785 što je daleko od potrebne vrijednosti za popuštanje po ovom kriteriju.



Slika 45. Vrijednost Hashinovog kriterija vlačnog popuštanja vlakana [-] u drugom i trećem sloju kompozitne ljuske

Hashinov kriterij tlačnog popuštanja matrice ostvaruje vrijednost 1, odnosno dolazi do popuštanja u gotovo svim slojevima. Do popuštanja ne dolazi u prvom i šestom sloju, čija je orijentacija 0° za prvi sloj i -30° za šesti sloj. Maksimalna vrijednost koju postiže prvi sloj iznosi 0,684 i pojavljuje se na prvom, unutarnjem konačnom elementu. Vrijednost koju postiže šesti sloj po ovom kriteriju popuštanja iznosi 0,9727. Parametar tlačnog oštećenja matrice sadrži maksimalnu vrijednost u iznosu od 0,8.

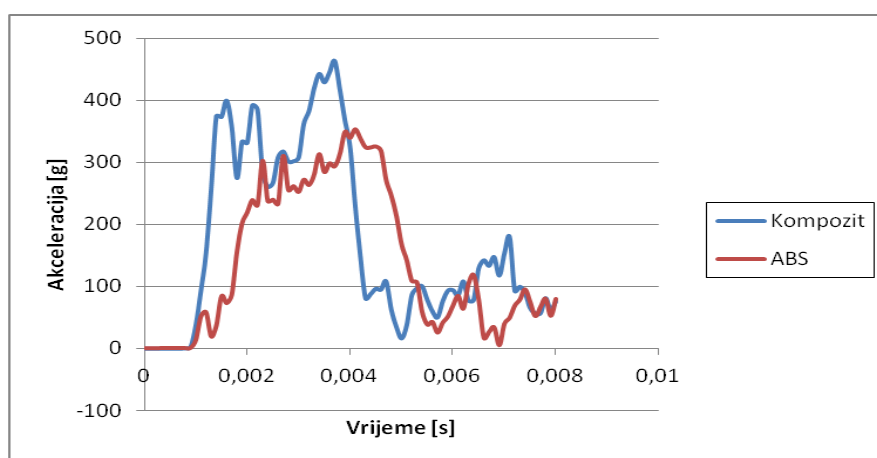
Prema Hashinovom kriteriju vlačnog popuštanja matrice većina slojeva sadrži vrijednost 1, odnosno dolazi do popuštanja slojeva. Na Slika 46 je prikazan prvi sloj prvog, unutrašnjeg konačnog elementa ljuske. Orijentacija prvog sloja je 0° , odnosno pruža se u pravcu referentne osi. Parametar vlačnog oštećenja matrice također ima vrijednost u iznosu od 0,8, poput parametra tlačnog oštećenja matrice.



Slika 46. Vrijednost Hashinovog kriterija vlačnog popuštanja matrice [-] u prvom sloju kompozitne ljuske

Dijagramom na Slika 47 prikazano je ubrzanje točke A. Krivulje dijagrama razlikuju se korištenim materijalom vanjske ljuske kacige, kompozitne i ljuske od ABS-a. Iznos maksimalnog ubrzanja točke A s kompozitnom ljuskom iznosi 456,98 g, a s ljuskom od ABS-a iznosi 352,65 g. Udarac se odvija u vremenu približno od 0,5 do 5 ms. Nepravilnosti krivulja izazvane su pomicanjem donjeg dijela glave i slobodnim kretanjem elemenata unutar mozga.

Promjenom materijala ljuske, korištenjem ABS-a umjesto kompozita, zbog manje krutosti došlo je do veće deformacije što se odrazilo na vršnu akceleraciju. Iznos ubrzanja ljusaka kaciga premašuje dopuštenu granicu propisanu standardom ECE R22.05 koja iznosi 275 g. Spuštanjem vrijednosti ubrzanja ispod dozvoljene granice koju propisuje standard, ne znači nužno prolazak ispitivanja energije apsorpcije udarca svih točaka naznačenih na Slika 16. Iako smanjene akceleracije, kaciga s ljuskom od ABS-a, zbog manje krutosti više se deformira od kompozitne ljuske, što predstavlja potencijalni problem pri ispitivanju krutosti kacige prema standardu ECE R22.05.



Slika 47. Dijagram akceleracije sa kompozitnom vanjskom ljuskom

Osim promjene materijalnog modela vanjske ljuske, varirana su i svojstva apsorpcijskog sloja. Korišten je EPS gustoće 90 kg/m^3 radi promatranja utjecaja na maksimalne vrijednosti akceleracije. Pri numeričkoj analizi javili su se problemi proizašli iz prevelike distorzije konačnih elemenata mozga, zbog čega nisu prikazani u ovom radu. Niti jedna od kaciga nije zadovoljila zahtjeve norme, međutim treba napomenuti razlike u modelima korištenih glava. Standardne ispitne glave su homogene i izrađene iz jedne vrste materijala, dok je u numeričkom modelu glave, korištenom u ovom radu, uzet u obzir biomehanički odziv mozga. Različita materijalna svojstva dijelova glave zahtjevaju daljnje analize i ispitivanje primjenjivosti kriterija postavljenog normom. Orijentacija slojeva, materijal, te sama geometrija značajno utječu na rezultate. Određivanje optimalne orijentacije slojeva, kao i idealnog materijala je iterativan postupak koji zahtjeva velik broj iteracija. Vrijeme trajanja provođenja numeričkih simulacija jedan je od ograničavajućih čimbenika koji je uvelike utjecao na broj odrađenih simulacija i postignute rezultate.

6. ZAKLJUČAK

Za provedenu numeričku analizu naprezanja motociklističke kacige pri udarnom opterećenju korišteni su početni uvjeti iz standarda ECE R22.05, ali nije korištena standardna ispitna glava. Svojstva numeričkog modela glave preuzeta su iz dostupne literature. Za potrebe validacije numeričkog modela modeliran je numerički model udarača koji se giba početnom brzinom od 6,3 m/s. Mjerenjem tlaka u određenim točkama uočava se razlika u rezultatima do koje dolazi zbog razlike u masi i pojednostavljene i različite geometrije. Iako se rezultati analize u potpunosti ne poklapaju sa SUFEHM numeričkim modelom, trend krivulja dijagrama tlak vrijeme potvrđuje ispravnost numeričkog modela glave korištenog u ovom radu.

Prilikom analize naprezanja motociklističke kacige korištena su dva materijalna modela vanjske ljuske, kompozitna i ljuska od ABS-a. Posebna pozornost pridodana je orijentaciji slojeva. Komponente kacige parcijalno su spojene kinematskom vezom *Tie* radi vjerodostojnijeg modeliranja plastične deformacije apsorpcijskog sloja. Simuliran je udarac u krutu nepomičnu podlogu. Procjena rizika ozljede glave određena je prema akceleraciji mjerenoj u određenoj točki lubanje. Maksimalna vrijednost akceleracije pri korištenju kompozitne ljuske iznosi 456,98 g, a ljuske od ABS-a 352,65 g. Dobivene akceleracije ne zadovoljavaju postavljeni kriterij od 275 g, ali dokazuju da je promjenom materijala moguće smanjiti rizik ozljede glave. Ljuska od ABS-a pokazuje da bi pri udaru došlo do velike plastične deformacije i vrlo vjerojatno do njenog loma. Korištenjem kompozitne ljuske također dolazi do proboja u pojedinim slojevima ljuske, ali ona pokazuje puno veću krutost od ljuske načinjene od ABS-a, što je čini boljim izborom.

Za dobivanje točnijih rezultata potrebno je posvetiti više pozornosti na modeliranje ispitne glave. Budući radovi svakako bi trebali sadržavati *falx cerebri*, odnosno podvostručenje ovojnice mozga *dure mater* i *tentorium cerebelli*. Analiza naprezanja motociklističke kacige pri udarnom opterećenju koristeći numerički model anatomske ispravne ljudske glave predstavlja zanimljivo ali izazovno područje za daljnja istraživanja.

LITERATURA

- [1] D. Pros, Završni rad, Materijali za izradu motocikla, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [2] Corporate history - Mercedes-Benz.html, <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/classic/history/corporate-history/>, [08.09.2017.]
- [3] Apex Racing Academy – Safety.html, <http://www.apexracing.in/safety-regulation/>, [08.09.2017.]
- [4] MRT motorcycle racing jacket.html, <https://www.mtech-racing.com/en/jacket/101-mrt.html> [08.09.2017.]
- [5] EN 13595-1_ 2002 - Protective clothing for professional motorcycle riders - Jackets, trousers and one piece or divided suits..html, <https://www.satira.com/ppe/EN13595.php>, [08.09.2017.]
- [6] RS-300 - Leather Racing Gloves _ iXS Motorcycle Gear.html, <http://moto.ixs.com/en/shop/leather-racing-gloves-rs-300>, [08.09.2017.]
- [7] Tracing the Evolution of the Motorcycle Helmet _ The BikeBandit Blog.html, <http://www.bikebandit.com/blog/post/tracing-the-evolution-of-the-motorcycle-helmet>, [09.09.2017.]
- [8] H. Cairns, Head Injuries in Motor-cyclists. The Importance of the Crash Helmet, British Medical Journal, Volume 2., No. 4213, October 4., 1941., str. 465-471,
- [9] The History of Motorcycle Helmets - Eagle Leather - Lakewood.html, <http://www.eagleleather.com/The-History-of-Motorcycle-Helmets-586/>, [09.09.2017.]
- [10] Picking the Best Motorcycle Helmet - A Buying Guide to Helmets _ MotoSport.html, <https://www.motosport.com/blog/sportbike-and-motorcycle-helmet-buying-guide>, [09.09.2017.]
- [11] C3 Pro - SCHUBERTH.html, <https://www.schuberth.com/en/products/motorbikes/helmets/c3-pro.html>, [09.09.2017.]
- [12] Neotec Features Summary _ Shoei Helmets & Accessories.html, <http://www.shoei-helmets.com/neotec-features-summary>, [09.09.2017.]
- [13] helmet_csi.pdf, http://www.helmetcheck.org/downloads/helmet_csi.pdf, [11.09.2017.]
- [14] Chia-Yuan Chang, Chih-Hsiang Ho, San-Yi Chang, *Design of a Helmet*, 2003

- [15] F.M.Shuaieba, A.M.S.Hamouda, M.M. Hamdan, R.S. Radin Umar, M.S.J. Hashmi, Motorcycle helmet: Part III. Manufacturing issues, *Journal of Materials Processing Technology*, volume 123, 10 svibnja 2002, str. 432-439
- [16] Fábio A.O. Fernandes, Ricardo J. Alves de Sousa, Rémy Willinger, Caroline Deck, *Finite Element Analysis of Helmeted Impacts and Head Injury Evaluation with a Commercial Road Helmet*, IRCOBI Conference, 2013.
- [17] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Naklada 500 (peto izdanje), Zagreb 2009.
- [18] Patent EP2289360A2 - Molded motorcycle helmet and method of manufacture - Google Patents.html, <https://www.google.com/patents/EP2289360A2?cl=en>, [01.11.2017.]
- [19] S. Farajzadeh Khosroshahi, U. Galvanetto, M. Ghajari, *Optimization of the Chin Bar of a Composite-Shell Helmet to Mitigate the Upper Neck Force*, 2016.
- [20] V. Tinard, C. Deck, R. Willinger, New methodology for improvement of helmet performances during impacts with regards to biomechanical criteria, *Materials and Design* 37, 2012. str. 79–88
- [21] Inside A Shoei Helmet - Technology _ Shoei Helmets & Accessories.html, <http://www.shoei-helmets.com/technology/inside-a-shoei-helmet.html> [01.11.2017.]
- [22] B. Marčić, Diplomski rad, Ispitivanje kaciga prema pravilniku ECE 22.05, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [23] Motorcycle Helmet Standards Explained_ DOT, ECE 22.05 & Snell.html, <https://ultimatemotorcycling.com/2013/04/08/motorcycle-helmet-standards-explained-dot-ece-22-05-snell/>, [02.11.2017]
- [24] Headforms for Helmet Testing Machines.html, <http://www.cadexinc.com/headforms.php>, [05.11.2017.]
- [25] Edward B. Beker, Comparison of Motorcycle Helmet Standards Snell M2005, M2010/2015, DOT and ECE 22-05, 29. rujan 2015.
- [26] Snell Foundation - helmet testing.html, <http://www.smf.org/testing>, [05.11.2017.]
- [27] J. Fanghanel, F. Pera, F. Anderhuber, R. Nitsch, *Waldeyerova anatomija čovjeka*, 17. njemačko izdanje prerađeno u cijelosti, 1. hrvatsko izdanje, Zagreb, Golden Marketing-Tehnička knjiga, 2009.
- [28] Ljudska lubanja – Wikipedija.html, https://hr.wikipedia.org/wiki/Ljudska_lubanja, [06.11.2017.]
- [29] Medicinski leksikon.html, <http://medicinski.lzmk.hr/>, [07.11.2017.]

- [30] mozak _ Hrvatska enciklopedija.html, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=42173>, [07.11.2017.]
- [31] About Materialise _ Materialise - Innovators you can count on.html, <http://www.materialise.com/en/about-materialise>, [07.11.2017.]
- [32] C. Deck, R. Willinger, Head injury prediction tool for protective systems optimisation, 7. Europska konferencija LS-DYNA, 2009.
- [33] H. Samaka, F. Tarlochan, *Finite Element (FE) Human Head Models / Literature Review*, International Journal of Scientific & Technology Research, Volume 2, Issue 7, srpanj 2013.
- [34] M. D. Gilchrist, Hyperelastic and viscoelastic properties of brain tissue in tension, University College Dublin, Belfield. 2012.
- [35] V. Kostopoulos, Y. P. Markopoulos, G. Giannopoulos, D. E. Vlachos, Composites: Part B 33, *Finite element analysis of impact damage response of composite motorcycle safety helmets*, University of Patras, str. 99-107, 2002.
- [36] Motorcycle Helmets _ Conehead Helmets.html, <http://coneheadhelmets.com.au/motorcycle-helmets/>, [10.11.2017.]
- [37] N.J. Mills, S. Wilkes, S. Derler, A. Flisch, FEA of oblique impact test on a motorcycle helmet, International Journal of Impact Engineering, 36, str. 913-925, 2009
- [38] Li-Tung Chang, Guan-Liang Chang, Ji-Zhen Huang, Shyh-Chour Huang, De-Shin Liu, Chih-Han Chang, Finite Element Analysis of the Effect of Motorcycle Helmet Materials Against Impact Velocity, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 26, No.6, str. 853-843, 2003.
- [39] ABAQUS analysis user manual
- [40] P.D. Soden, M.J. Hinton, A.S. Kaddoura, Lamina properties, lay-up configuration and loading conditions for a range of fibre-reinforced composite laminates, Composites Science and technology, Volume 58, Issue 7, str. 1011-1022, srpanj 1998.
- [41] Lopes, C., Camanho, P. P., and Gurdal, Z., Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations. Composites Science and Technology, 69, str. 937-947. 2009
- [42] D. Ivančević, Diplomski rad, Analiza udarnih oštećenja zakrilca velikog putničkog aviona, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [43] J. Edward Callahan, Analysis of Composite Helmet Impact by the Finite Element Method, Virginia Polytechnic Institute and state University, rujan 2011.

- [44] Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Impact Grade, Molded.html, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0177ea648dd340abb81c25b4efe613ad>, [27.11.2017.]

PRILOZI

I. CD-R disc